

Sebastian Flechsig

**Vergleichende Untersuchung zwischen DIN EN
1993 (Eurocode) und DIN 18800 am Beispiel von
gelenkigen Anschlüssen
(Stirnplatte, Doppelwinkel)**

BACHELORARBEIT

HOCHSCHULE MITTWEIDA

UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Maschinenbau/ Feinwerktechnik

Mittweida, 2012

Vergleichende Untersuchung zwischen DIN EN 1993 (Eurocode)
und DIN 18800 am Beispiel von gelenkigen Anschlüssen
(Stirnplatte, Doppelwinkel)

Comparative investigation between DIN EN 1993 (Eurocode) and
DIN 18800 at the example of articulated connection details

Bachelorarbeit

Hochschule Mittweida, University of Applied Sciences
Technikumsplatz 17, D-09648 Mittweida

Eingereicht von: Sebastian Flechsig
Fakultät: Maschinenbau/ Feinwerktechnik
Fachgruppe: Stahl- und Metallbau
Seminargruppe: SM08w1-B
Matrikelnummer: 21574
Adresse: Zum Steinpleiser Bahnhof 14, 08412 Werdau OT Steinpleis
Erstprüfer: Prof. Dr.-Ing. Torsten Laufs
Zweitprüfer: Dipl.-Ing. Dirk Wittig

Bibliographische Beschreibung

Sebastian Flechsig:

Vergleichende Untersuchung zwischen DIN EN 1993 (Eurocode) und DIN 18800 am Beispiel von gelenkigen Anschlüssen (Stirnplatte, Doppelwinkel) – 2012 – 150 S. Mittweida, Hochschule Mittweida, Fachbereich Maschinenbau/Feinwerktechnik, Bachelorarbeit, 2012

Referat

Der voraussichtlich ab 2014 vollständig gültige Eurocode 3 als Regelwerk für Bemessung, Konstruktion und Entwurf von Stahlbauten wird in dieser Bachelorarbeit anhand von gelenkigen Anschlüssen mit der DIN 18800 verglichen.

Im theoretischen Vergleich werden die Rechenmethoden der beiden Normen gegenübergestellt; hierbei wird besonders intensiv auf den Nachweis der Verbindungen (Schweißnähte und Schrauben) eingegangen.

Im praktischen Teil der Arbeit werden Vergleichsrechnungen am Beispiel von Stirnplatten- und Doppelwinkelanschlüssen durchgeführt, die Aufschluss über die Abweichungen der Rechenmethodik nach DIN 1993 und DIN 18800 geben.

Eine intensive Diskussion der Rechenergebnisse zeigt die Ursachen der Abweichungen jedes einzelnen Nachweises auf.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	5
Tabellenverzeichnis	6
Abkürzungsverzeichnis	8
1 Einleitung	14
1.1 Allgemeines	14
1.2 Zielstellung der Arbeit	16
1.3 Abgrenzung der Arbeit	16
2 Schraubenverbindung	17
2.1 Allgemeines	17
2.1.1 Schraubenwerkstoff	17
2.1.2 Schraubenform	19
2.1.3 Art der Vorspannung	19
2.1.4 Art der Beanspruchung	20
2.2 Vergleich Anwendungshinweise von Schrauben: DIN 18800-1 und DIN EN 1993-1-1 und 1-8	21
2.3 Vergleich Berechnungsmodel von Schrauben: DIN 18800-1 und DIN EN 1993-1-1 und 1-8	29
3 Schweißverbindung	37
3.1 Allgemeines	37
3.2 Vergleich Anwendungshinweise von Schweißnähten: DIN 18800-1 und DIN EN 1993-1-1 und 1-8	40
3.3 Vergleich Berechnungsmodel von Schweißnähten: DIN 18800-1 und DIN EN 1993-1-1 und 1-8	42
3.3.1 Berechnung nach DIN 18800-1	42
3.3.1.1 Stumpfnahht	42
3.3.1.2 Kehlnahht	45
3.3.2 Berechnung nach DIN EN 1993-1-1 und 1-8/NA	47
3.3.2.1 Richtungsbezogenes Verfahren	47
3.3.2.2 Vereinfachtes Verfahren	51
4 Vergleichsrechnung Stirnplatte	54
4.1 Stirnplattenvariante 1	54

4.1.1	Stirnplatte 1 nach DIN	55
4.1.1.1	Untersuchung des Trägertseges	55
4.1.1.2	Nachweis Schweißnaht, Verbindung Trägersteg-Stirnplatte	56
4.1.1.3	Nachweis der Schrauben, Verbindung Stirnplatte- Anschlussfläche	57
4.1.1.3.1	Ermittlung der Grenzabscherkraft:	57
4.1.1.3.2	Überprüfung der Schraubenabstände	57
4.1.1.3.3	Ermittlung der Grenzlochleibungskraft:	58
4.1.1.3.4	maximal aufnehmbare Kraft der Schraubverbindung	60
4.1.1.3.5	Nachweis	60
4.1.1.4	Nachweis der Risslinie	60
4.1.2	Stirnplatte 1 nach Eurocode	61
4.1.2.1	Untersuchung des Trägersteges	61
4.1.2.2	Nachweis Schweißnaht, Verbindung Trägersteg-Stirnplatte	62
4.1.2.3	Nachweis der Schrauben, Verbindung Stirnplatte- Anschlussfläche	63
4.1.2.3.1	Ermittlung der Grenzabscherkraft:	63
4.1.2.3.2	Überprüfung der Schraubenabstände	63
4.1.2.3.3	Ermittlung der Grenzlochleibungskraft:	64
4.1.2.3.4	maximal aufnehmbare Kraft der Schraubverbindung	67
4.1.2.3.5	Nachweis	67
4.1.2.4	Nachweis der Blockversagen	67
4.1.3	Ergebnisvergleich	68
4.2	Stirnplattenvariante 2	69
4.2.1	Stirnplatte 2 nach DIN	70
4.2.1.1	Untersuchung des Trägersteges	70
4.2.1.2	Nachweis der Schweißnaht, Verbindung Träger-Stirnplatte	71
4.2.1.3	Nachweis der Schrauben, Verbindung Trägersteg- Anschlussfläche	72
4.2.1.3.1	Ermittlung der Grenzabscherkraft	72
4.2.1.3.2	Überprüfung der Schraubenabstände	72
4.2.1.3.3	Ermittlung der Grenzlochleibungskraft	73
4.2.1.3.4	maximal aufnehmbare Kraft der Schraubenverbindung	75
4.2.1.3.5	Nachweis	75
4.2.1.4	Nachweis der Risslinie	75
4.2.2	Stirnplatte 2 nach Eurocode	77
4.2.2.1	Untersuchung des Trägersteges	77
4.2.2.2	Nachweis der Schweißnaht ,Verbindung Trägersteg- Stirnplatte	78

4.2.2.3	Nachweis der Schrauben, Verbindung Stirnplatte-Anschlussfläche	79
4.2.2.3.1	Ermittlung der Grenzabscherkraft	79
4.2.2.3.2	Überprüfung der Schraubenabstände	79
4.2.2.3.3	Ermittlung der Grenzlochleibungskraft	80
4.2.2.3.4	maximal aufnehmbare Kraft der Schraubenverbindung	83
4.2.2.3.5	Nachweis	83
4.2.2.4	Nachweis Blockversagen	83
4.2.3	Ergebnisvergleich	84
4.3	Prozentuale Auswertung Stirnplatte	85
5	Vergleichsrechnung Doppelwinkel	86
5.1	Doppelwinkelvariante 1	86
5.1.1	Doppelwinkel 1 nach DIN	87
5.1.1.1	Untersuchung des Trägertseges	87
5.1.1.2	Ermittlung der resultierenden Schraubenkraft	88
5.1.1.3	Nachweis der Schrauben (Verbindung Doppelwinkel IPE 400)	88
5.1.1.3.1	Ermittlung Grenzabscherkraft	88
5.1.1.3.2	Ermittlung der Grenzlochleibungskraft in Z-Richtung:	89
5.1.1.3.3	Ermittlung der Grenzlochleibungskraft in X-Richtung	91
5.1.1.4	Nachweis der Schrauben (Verbindung IPB 600 Winkel)	94
5.1.1.4.1	Ermittlung Grenzabscherkraft	94
5.1.1.4.2	Ermittlung der Grenzlochleibungskraft in Z-Richtung	94
5.1.2	Doppelwinkel 1 nach Eurocode	98
5.1.2.1	Untersuchung des Trägersteges	98
5.1.2.2	Ermittlung der resultierenden Schraubenkraft	98
5.1.2.3	Nachweis der Schrauben (verbindung Doppelwinkel IPE 400)	99
5.1.2.3.1	Ermittlung Grenzabscherkraft	99
5.1.2.3.2	Ermittlung der Grenzlochleibungskraft in Z-Richtung	100
5.1.2.3.3	Ermittlung der Grenzlochleibungskraft in X-Richtung	103
5.1.2.4	Nachweis der Schrauben (Verbindung IPB 600 Winkel)	106
5.1.2.4.1	Ermittlung Grenzabscherkraft	106
5.1.2.4.2	Ermittlung der Grenzlochleibungskraft in Z-Richtung	107
5.1.3	Ergebnisvergleich	111
5.2	Doppelwinkelvariante 2	112
5.2.1	Doppelwinkel 2 nach DIN	113
5.2.1.1	Untersuchung des Trägersteges	113
5.2.1.2	Ermittlung der resultierenden Schraubenkraft	114
5.2.1.3	Nachweis der Schrauben (Verbindung Doppelwinkel IPE 600)	114
5.2.1.3.1	Ermittlung der Grenzabscherkraft	114

5.2.1.3.2	Ermittlung der Grenzlochleibungskraft in Z-Richtung	115
5.2.1.3.3	Ermittlung der Grenzlochleibungskraft in X-Richtung	117
5.2.1.4	Nachweis der Schrauben (Verbindung IPB 700 Winkel)	120
5.2.1.4.1	Ermittlung der Grenzabscherkraft	120
5.2.1.4.2	Ermittlung der Grenzlochleibungskraft in Z-Richtung	120
5.2.2	Doppelwinkel 2 nach Eurocode	124
5.2.2.1	Untersuchung des Trägersteges	124
5.2.2.2	Ermittlung der resultierenden Schraubenkraft	124
5.2.2.3	Nachweis der Schrauben (Verbindung Doppelwinkel IPE 600)	125
5.2.2.3.1	Ermittlung Grenzabscherkraft	125
5.2.2.3.2	Ermittlung der Grenzlochleibungskraft in Z-Richtung	126
5.2.2.3.3	Ermittlung der Grenzlochleibungskraft in X-Richtung	129
5.2.2.4	Nachweis der Schrauben (Verbindung IPB 700 Winkel)	132
5.2.2.4.1	Ermittlung der Grenzabscherkraft	132
5.2.2.4.2	Ermittlung der Grenzlochleibungskraft in Z-Richtung	133
5.2.3	Ergebnisvergleich	137
5.3	Prozentuale Auswertung Doppelwinkel	138
6	Diskussion	139
6.1	Grundwerkstoff	139
6.2	Schweißnaht	140
6.3	Risslinie/ Blockversagen	141
6.4	Abscheren	141
6.5	Lochleibung	142
7	Fazit	144
8	Anlagen	146
8.1	Anlage 1 - Charakteristische Werte für Schraubenwerkstoff	146
8.2	Anlage 2 – Schaft und Spannungsquerschnitt	146
8.3	Anlage 3 – Charakteristische Werte für Grundwerkstoff	147
9	Literaturverzeichnis	148
	Selbstständigkeitserklärung	150

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Schraubenform	19
Abbildung 2 Beanspruchungsarten der Schrauben	20
Abbildung 3 Lange Anschlüsse	21
Abbildung 4 Schraubenabstand nach DIN 18800	27
Abbildung 5 Schraubenabstand nach Eurocode	27
Abbildung 6 Risslinie	35
Abbildung 7 Zentrische Belastung	35
Abbildung 8 Exentrische Belastung	35
Abbildung 9 Nahtdicke Stumpfnah	41
Abbildung 10 Nahtdicke Kehlnah	41
Abbildung 11 Berechnungsmodell Stumpfnah	42
Abbildung 12 Berechnungsmodell Kehlnah DIN	45
Abbildung 13 Schweißnahtspannungen Kehlnah	45
Abbildung 14 Berechnungsmodell richtungsbezogenes Verfahren	47
Abbildung 15 Berechnungsmodell Vereinfachtes Verfahren 1	51
Abbildung 16 Berechnungsmodell Vereinfachtes Verfahren 2	52
Abbildung 17 Stirnplattenanschluss Variante 1	54
Abbildung 18 Stirnplattenanschluss Variante 2	69
Abbildung 19 Doppelwinkelanschluss Variante 1	86
Abbildung 20 Schraubenkraft	88
Abbildung 21 Schraubenkraft	99
Abbildung 22 Doppelwinkelvariante 2	112
Abbildung 23 Schraubenkraft	114
Abbildung 24 Schraubenkraft	125

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Glossar Lateinisch	9
Tabelle 2 Glossar Griechisch	12
Tabelle 3 Charakteristische Werte für Schraubenwerkstoffe	18
Tabelle 4 Schraubenanordnung und –anzahl	21
Tabelle 5 Einteilung der Schrauben	22
Tabelle 6 Nennlochspiel	24
Tabelle 7 Zusammenwirken verschiedener Verbindungsmittel	25
Tabelle 8 Schaftdurchmesser	26
Tabelle 9 Abstandsmaße	27
Tabelle 10 Schraubenrandabstände nach DIN	28
Tabelle 11 Schraubenlochabstände nach DIN	28
Tabelle 12 Schraubenrandabstände nach Eurocode	28
Tabelle 13 Schraubenlochabstände nach Eurocode	28
Tabelle 14 Gegenüberstellung wichtiger Formelzeichen	29
Tabelle 15 Abscheren	30
Tabelle 16 Lochleibung	31
Tabelle 17 Zug	32
Tabelle 18 Durchstanzen	33
Tabelle 19 Zug und Abscheren	34
Tabelle 20 Risslinie/Blockversagen	35
Tabelle 21 Definition Schweißen	37
Tabelle 22 Schweißverfahren im Stahlbau	38
Tabelle 23 Konstruktive Festlegungen von Schweißnähten	40
Tabelle 24 Spannungen und äußere Einflüsse nach DIN 1880043	
Tabelle 25 Nachweis einer Stumpfnahht nach DIN	43
Tabelle 26 Grenzschnweißnahtspannung	44
Tabelle 27 α_w Beiwert	44
Tabelle 28 Nachweise einer Kehlnahht nach DIN	46
Tabelle 29 Einwirkung durch Schub längs der Naht	48
Tabelle 30 Einwirkung Zug/Druck quer zur Naht	48
Tabelle 31 Nachweis richtungsbezogenes Verfahren	49

Tabelle 32 Ermittlung $\sigma \perp w, Rd$	49
Tabelle 33 Ermittlung σ_{wv}, Rd	50
Tabelle 34 Korrelationsbeiwert	50
Tabelle 35 Vereinfachtes Verfahren/ Einwirkungen	52
Tabelle 36 Vereinfachtes Verfahren/ Nachweis	53
Tabelle 37 Ermittlung F_{vw}, Rd	53
Tabelle 38 Ergebnisvergleich Stirnplatte 1	68
Tabelle 39 Ergebnisvergleich Stirnplatte 2	84
Tabelle 40 Prozentuale Auswertung Stirnplatte	85
Tabelle 41 Ergebnisvergleich Doppelwinkel 1	111
Tabelle 42 Ergebnisvergleich Doppelwinkel 2	137
Tabelle 43 Prozentuale Auswertung Doppelwinkel	138
Tabelle 44 Vergleich Rand-/ Innenschraube	142
Tabelle 45 Charakteristische Werte für Schraubenwerkstoffe	146
Tabelle 46 Schaft- und Spannungsquerschnitt	146
Tabelle 47 Charakteristische Werte für Grundwerkstoff	147

Abkürzungsverzeichnis

bzw.	beziehungsweise
DIN	Deutsches Institut für Normung
EN	Europäische Norm
f.	folgende
ff.	und folgende
max.	maximal
min.	minimal
vgl.	Vergleiche

Tabelle 1 Glossar Lateinisch (eigene Darstellung)¹²

Glossar Lateinisch	
A	Bruttoquerschnittsfläche
a	Rechnerische Schweißnahtdicke
A_w	Wirksame Schweißnahtfläche
a_w	Rechnerische Schweißnahtdicke
A_{Brutto}	Querschnittsfläche ohne Abminderung
A_{Netto}	Querschnittsfläche mit Abminderung
A_{nt}	Zugbeanspruchter Nettoquerschnittsfläche
A_{vt}	Schubbeanspruchte Nettoquerschnittsfläche
A_s	Spannungsquerschnittsfläche
A_{Sch}	Bruttoquerschnittsfläche
A_{Sp}	Spannungsquerschnittsfläche
$B_{p,R,d}$	Grenzdurchstanzkraft
d	Schaftdurchmesser
d_0	Lochdurchmesser
d_L	Lochdurchmesser
d_m	Mittelwert aus Eckmaß und Schlüsselweite
d_{Sch}	Schaftdurchmesser
e	Lochabstand in Kraftrichtung

¹vgl. DIN 18800-1 (2008), S. 3 ff.

²vgl. DIN EN 1993-1-1 (2010), S.12 ff.

e_1	Randabstand in Krafrichtung
e_2	Randabstand rechtwinklig zur Krafrichtung
e_3	Lochabstand rechtwinklig zur Krafrichtung
F_b	Äußere Belastung
$F_{b,R,d}$	Grenzlochleibungskraft
$F_{t,E,d}$	Äußere Belastung
$F_{t,R,d}$	Grenzzugkraft
f_u	Zugfestigkeit Grundwerkstoff
$f_{u,b}$	Zugfestigkeit Schraube
$f_{u,b,k}$	Zugfestigkeit Schraube
F_V	Äußere Beanspruchung
$F_{v,R,d}$	Grenzabscherkraft
$F_{vw,Ed}$	Resultierende Kraft in der Schweißnaht
f_y	Streckgrenze Grundwerkstoff
$f_{y,b}$	Streckgrenze Schraube
$f_{y,b,k}$	Streckgrenze Schraube
$F_x / F_y / F_z$	Äußere Beanspruchung
k_1	Lochleibungsbeiwert
k_2	Zugbeiwert
l	Wirksame Schweißnahtlänge
L_j	Abstand des ersten und letzten Verbindungsmittels
L_w	Wirksame Schweißnahtlänge

l_K	Klemmlänge
m	Anzahl der Scherflächen
$\min t$	Dünnstes Blech
M_y	Äußeres Moment
N	Äußere Beanspruchung
n	Anzahl der Scherflächen
$N_{R,d}$	Grenzzugkraft
p_1	Lochabstand in Krafrichtung
p_2	Lochabstand rechtwinklig zur Krafrichtung
s	Schlüsselweite
$\sin / \cos / \tan$	Winkelfunktion
t	Blechdicke
t_p	Blechdicke unter Schraubenkopf oder Mutter
V_a	Äußere Beanspruchung
$V_{a,R,d}$	Grenzabscherkraft
$V_{eff,1,R,d}$	Grenzkraft für Blockversagen mit zentrischer Belastung
$V_{eff,2,R,d}$	Grenzkraft für Blockversagen mit exzentrischer Belastung
V_l	Äußere Belastung
$V_{l,R,d}$	Grenzlochleibungskraft
$V_z / V_y / V_{\perp} / V_{\parallel}$	Äußere Beanspruchung

Tabelle 2 Glossar Griechisch (eigene Darstellung)³⁴

Glossar Griechisch	
α_a	Abscherbeiwert
α_l	Lochleibungsbeiwert
α_d	Lochleibungsbeiwert
α_v	Abscherbeiwert
β_{Lf}	Abminderungsbeiwert
β_{Lw}	Abminderungsbeiwert
γ_F	Teilsicherheitsbeiwert
γ_M	Teilsicherheitsbeiwert
γ_{M0}	Teilsicherheitsbeiwert
γ_{M1}	Teilsicherheitsbeiwert
γ_{M2}	Teilsicherheitsbeiwert
Δd	Lochspiel
σ_{\perp}	Biegespannung
σ_d	Normalspannung
$\sigma_{R,d}$	Grenznormalspannung
$\sigma_{W,R,d}$	Grenzschweißnahtspannung
$\sigma_{w,v}$	Schweißnahtspannung
τ_{\perp}	Schubspannung

³vgl. DIN 18800-1 (2008), S. 3 ff.

⁴vgl. DIN EN 1993-1-1 (2010), S.12 ff.

$\tau_{ }$	Schubspannung
$\tau_{R,d}$	Grenzschubspannung

1 Einleitung

1.1 Allgemeines

Um die neusten Erkenntnisse aus Forschung und Entwicklung berücksichtigen zu können unterliegen Regelwerke ständiger Änderung und Bearbeitung.

Eine einschneidende Änderung im Stahlbau ist die Einführung des Eurocodes. Es soll die DIN 18800 als Regelwerk für Entwurf, Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten abgelöst und durch den Eurocode 3 in Form der DIN EN 1993 ersetzt werden. Grund der Ablösung der DIN 18800 ist nicht etwa eine Veralterung der Rechenmethodik sondern vielmehr eine Folge fortschreitender Globalisierung, die dem Wunsch nach einem einheitlichen Regelwerk für einen Großteil von Europa aufkommen ließ.

Bereits seit über 30 Jahren beschäftigen sich Ingenieure aus ganz Europa mit der Erarbeitung einer einheitlichen Norm. Das Europäische Komitee für Normung (CEN) wurde mit der Lösung des Problems beauftrag⁵.

Das neue Regelwerk soll nicht nur bei der Bemessung von Stahlbauten hilfreich sein, sondern auch bei der Gestaltung von Holz, Beton usw. als Vorschrift dienen. Somit wurde der Eurocode in 9 Teile gegliedert.

EN 1990, Eurocode 0:	Grundlagen der Tragwerksplanung;
EN 1991, Eurocode 1:	Einwirkung auf Tragwerke;
EN 1992, Eurocode 2:	Bemessung und Konstruktion von Stahlbetonbauten;
EN 1993, Eurocode 3:	Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten;
EN 1994, Eurocode 4:	Bemessung und Konstruktion von Stahl-Beton-Verbundbauten;
EN 1995, Eurocode 5:	Bemessung und Konstruktion von Holzbauten;

⁵vgl. Auerswald (2009), S. 3

EN 1996, Eurocode 6: Bemessung und Konstruktion von Mauerwerksbauten;

EN 1997, Eurocode 7: Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik;

EN 1998, Eurocode 8: Auslegung von Bauwerken gegen Erdbeben;

EN 1999, Eurocode 9: Bemessung und Konstruktion von Aluminiumkonstruktionen⁶.

Man verspricht sich von der Umstellung europaweite einheitliche Entwurfskriterien, das Erstellen einer einheitlichen Basis für Forschung und Entwicklung, Harmonisierung nationaler Unterschiede, europaweite Ausschreibungen von Bauleistungen und einen Austausch von Dienstleistungen und Produkten im Bauwesen.

Jedes Land hat zusätzlich zum Eurocode einen nationalen Anhang. Darin werden Erläuterungen gegeben, und nationale Parameter wie Teilsicherheitsbeiwerte definiert.

Für den Eurocode 3 gibt es in Sachsen eine Art Einführungsprozess, der den Stahlbaubetrieben, welche ihre Herstellerqualifikation in Form des Ü-Zeichens nach DIN 18800-7 erhalten haben, noch bis Juni 2014 die Bemessung nach DIN 18800-1 bis -4 und die Fertigung nach DIN 18800-7 erlaubt. Betriebe die bereits das CE-Zeichen mit dem EG-Konformitätszertifikat nach EN 1090-1 haben sind jedoch verpflichtet nach DIN EN 1993 für Stahlbau und 1994 für Stahl und Beton zu bemessen, und nach 1090-2 zu fertigen⁷.

Der Eurocode ist ein großer Fortschritt im Bauwesen von Europa. Es konnten jedoch nicht alle gesteckten Ziele in vollem Umfang erfüllt werden. So lassen die nationalen Anhänge den Effekt der einheitlichen Richtlinie etwas verblassen, und es konnten keine Normen für ungewöhnliche Baulösungen gefunden werden.

⁶vgl. Auerswald (2009), S. 4

⁷vgl. Bundesingenieurkammer (2012) S. 2 ff

1.2 Zielstellung der Arbeit

Ziel dieser Bachelorarbeit ist einen Vergleich zwischen DIN 18800 und dem Eurocode 3. Es sollen hierfür die theoretischen Grundlagen gelegt werden indem die Gemeinsamkeiten und Unterschiede der Regelwerke aufzeigt und gegenüberstellt werden. Des Weiteren sollen im praktischen Teil der Abschlussarbeit Beispielrechnungen an Stahlbauanschlüssen die rechnerischen Abweichungen aufzeigen. In der Diskussion werden die Rechenergebnisse analysiert, und die Ursachen der Abweichungen gefunden.

1.3 Abgrenzung der Arbeit

Im theoretischen Teil erfolgt der Normenvergleich anhand von Schrauben und Schweißnähten. Hierfür wurden von mir spezielle Vergleichsaspekte gewählt, die für die späteren Berechnungen von Bedeutung sind, oder große Unterschiede der Regelwerke aufzeigen.

Ich habe einen gelenkigen Stirnplatten- und einen gelenkigen Doppelwinkelanschluss zur Hilfe genommen um Vergleichsrechnungen durchführen zu können.

In der Diskussion wurde der Fokus auf den Vergleich von aufnehmbaren Kräften, Rechenaufwand und möglichen Zusammenhängen mit Materialdicken gelegt.

2 Schraubenverbindung

Im zweiten Kapitel meiner Bachelorarbeit liegt das Hauptaugenmerk auf der Schraubenverbindung. Anfangs wird ein kleiner Überblick über die verschiedenen Schraubenarten und -formen gegeben. Im zweiten und dritten Teil dieses Kapitels sollen sowohl konstruktive Vorgaben als auch Rechenmethodik zwischen DIN 18800 und Eurocode 3 verglichen werden. Hierzu werden von mir ausgewählte Vergleichskriterien tabellarisch gegenübergestellt, um die theoretischen Grundlagen für meine Berechnungen zu legen.

2.1 Allgemeines

Das am häufigsten im Stahlbau verwendete Verbindungsmittel ist die Schraube. Sie gehört der Gruppe der lösbaren Verbindungsmittel an. Mit Hilfe der Schraube können transportfähige Einzelbauteile zu einem Gesamttragwerk auf der Baustelle montiert werden. Da sowohl gelenkige als auch biegesteife Anschlüsse realisiert werden können, ist die Schraube sehr flexibel einsetzbar. Der zur Endmontage benötigte geringe technologische Aufwand macht die Schraube zu einer relativ preiswerten Verbindung. Um den unterschiedlichen Beanspruchungsfällen gerecht zu werden, gibt es viele unterschiedliche Varianten dieses Verbindungsmittels. In erster Linie unterscheiden sie sich voneinander in Werkstoff, Form, Art der Vorspannung, Art der Beanspruchung und Wirkungsweise.⁸

2.1.1 Schraubenwerkstoff

Der Schraubenwerkstoff hat erheblichen Einfluss auf die Beanspruchbarkeit der Verbindung durch Zugkraft oder Querkraft. Es wurde eine Einteilung der Schraubenwerkstoffe nach Festigkeitsklassen vorgenommen⁹.

⁸ vgl. Wagenknecht (2009), S. 1

⁹ vgl. Wagenknecht (2009), S. 1

Schrauben mit der Festigkeitsklasse 8.8 oder größer sind hochfeste Schrauben. Die Festigkeitsklasse ist eine Art Zahlencode, mit dessen Hilfe sowohl die Zugfestigkeit als auch die Streckgrenze ermittelt werden können. Multipliziert man die erste Zahl mit 100, so erhält man die Zugfestigkeit in N/mm². Multipliziert man 1/10 der zweiten Zahl mit der Zugfestigkeit, so erhält man die Streckgrenze in N/mm².

Beispiel:

Eine Schraube der Festigkeitsklasse 5.6

Zugfestigkeit $f_{ubk} = 5 \cdot 100 = 500 \text{ N/mm}^2$

Streckgrenze $f_{ybk} = 6/10 \cdot 500 = 300 \text{ N/mm}^2$

Tabelle 3 Charakteristische Werte für Schraubenwerkstoffe (eigene Darstellung, in Anlehnung an Engelmann (2012), S. 4.5.)

de: Festigkeitsklasse	4.6	-	5.6	-	-	8.8	10.9
eu: Schraubenfestigkeitsklasse	4.6	4.8	5.6	5.8	6.8	8.8	10.9
Streckgrenze: N/mm ²	de: $f_{y,b,k}$	240	-	300	-	-	640 900
	eu: f_{yb}	240	320	300	400	480	640 900
Zugfestigkeit: N/mm ²	de: $f_{u,b,k}$	400	400	500	-	-	800 1000
	eu: f_{ub}	400	400	500	500	600	800 1000

2.1.2 Schraubenform

Hauptsächlich unterscheidet man die Schrauben in rohe Schrauben und Passschrauben. Handelt es sich um Schrauben der Festigkeitsklasse 8.8 und 10.9 so bezeichnet man diese als hochfest. Das Gewinde der Schrauben ist nach DIN 13-1 ausgeführt und wird als metrisches Gewinde mit M abgekürzt.

Die Schlüsselweite bei hochfesten Verbindungen unterscheidet sich von der Schlüsselweite der rohen Schrauben.

Zu einer Schraubengarnitur gehört eine Schraube, eine Mutter und mindestens eine Unterlegscheibe, die mutterseitig anzuordnen ist. Bei hochfesten Schraubenverbindungen ist das Verwenden von zwei Unterlegscheiben vorgeschrieben.

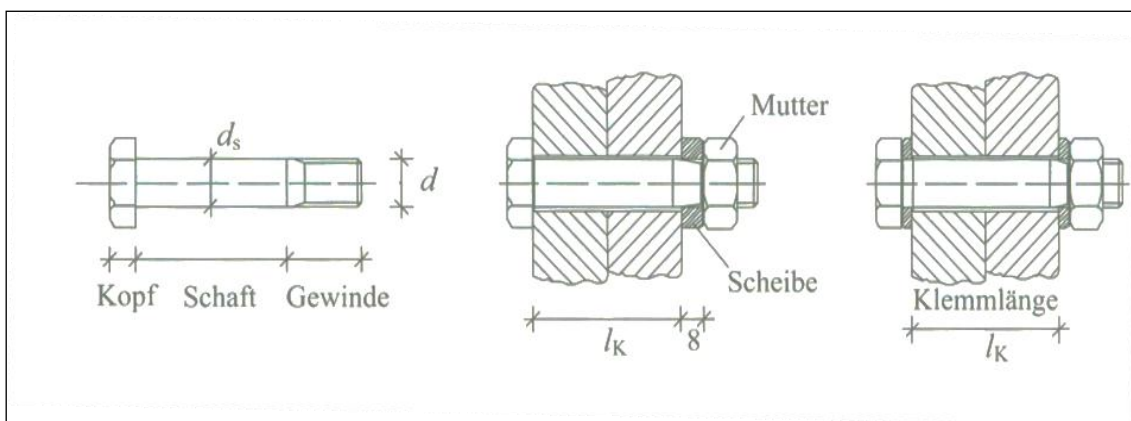


Abbildung 1 Schraubenform¹⁰

2.1.3 Art der Vorspannung

Als Vorspannung bezeichnet man das kontrollierte Aufbringen einer definierten Vorspannkraft. Hierbei gibt es verschiedene Varianten diese Vorspannkraft aufzubringen. Nach DIN unterscheidet man in Drehmomentverfahren, Drehimpulsverfahren, Drehwinkelverfahren und den kombinierten Verfahren¹¹. Nach Eurocode gibt es lediglich die Einteilung in kontrolliert voll vorgespannt und nicht voll vorgespannte Verbindung.

¹⁰vgl. Wagenknecht (2011), S. 4

¹¹vgl. Wagenknecht (2009), S. 4

2.1.4 Art der Beanspruchung

Die Art der Beanspruchung der Schraube ist abhängig von der Kraft, welche die Schraube übertragen soll. Bei einer Kraftübertragung in Richtung der Schraubenachse wird die Schraube auf Zug beansprucht. Eine Kraftübertragung der Schraube auf Druck ist nicht möglich, da diese Kraft von den Kontaktflächen der zu verbindenden Bleche übertragen wird¹².

Bei einer Kraftübertragung quer zur Schraubenachse kommt es sowohl zur Abscherbeanspruchung der Schraube, als auch zur Biegung der Schraube. Das Grundmaterial wird in diesen Fall an der Kontaktfläche von Schraube zu Lochwand auf Druck beansprucht, und es entsteht Lochleibung.

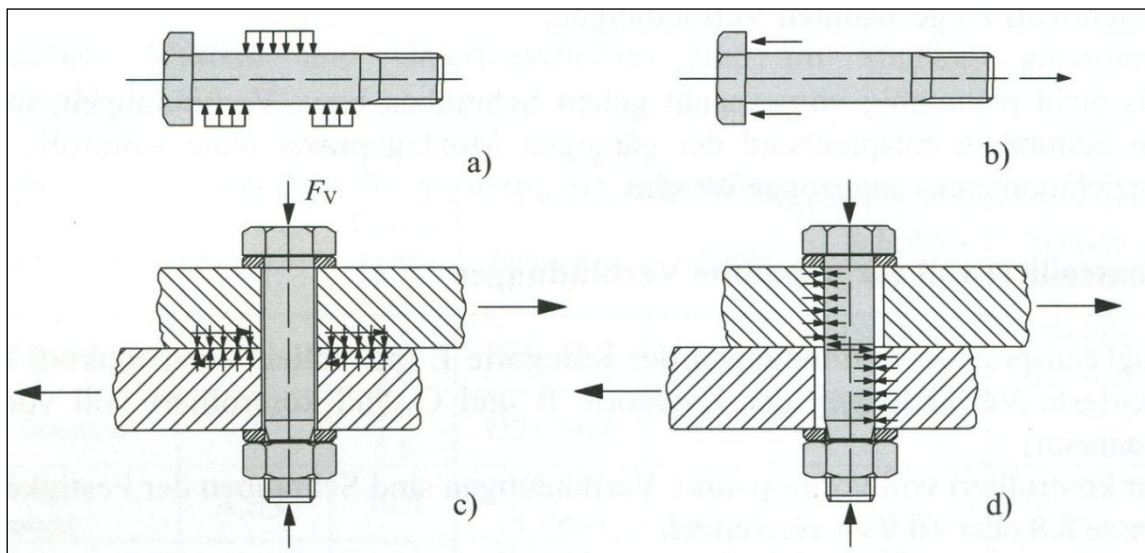


Abbildung 2 Beanspruchungsarten der Schrauben¹³

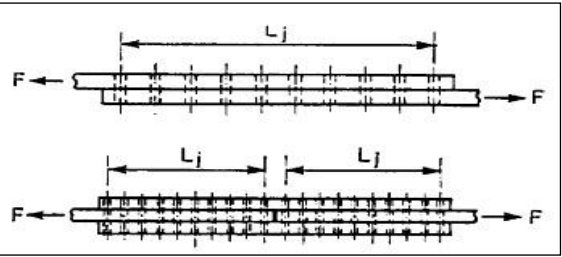
Es besteht auch die Möglichkeit, dass die Schraube mit einer Kombination der Beanspruchungsarten, sowohl in Richtung der Schraubenachse, als auch quer zur Schraubenachse gleichzeitig beansprucht wird.

¹²vgl. Wagenknecht (2009), S. 4 f.

¹³vgl. Wagenknecht (2011), S. 6

2.2 Vergleich Anwendungshinweise von Schrauben: DIN 18800-1 und DIN EN 1993-1-1 und 1-8

Tabelle 4 Schraubenanordnung und –anzahl (eigene Darstellung in Anlehnung an Engelmann (2012), S. 4.4)

DIN 18800-1	DIN EN 1993-1-8
Schraubenanordnung und -anzahl	
Element 504:	3.8
<p>„Stöße und Anschlüsse sollen gedungen ausgebildet werden. Unmittelbare und symmetrische Stoßdeckung ist anzustreben. Die einzelnen Querschnittsteile sollen für sich angeschlossen oder gestoßen werden.“¹⁴</p> <p>Element 803:</p> <p>„Bei unmittelbaren Laschen- und Stahlbauanschlüssen dürfen in Krafrichtung hintereinander liegend höchstens 8 Schrauben oder Nieten für den Nachweis berücksichtigt werden. Anmerkung: Bei kontinuierlicher Krafteinleitung ist eine obere Begrenzung nicht erforderlich.“¹⁵</p>	<p>„Wenn der Abstand L_j zwischen den Achsen des ersten und des letzten Verbindungsmittels in einem langen Anschluss, gemessen in Richtung der Kraftübertragung mehr als 15 d beträgt, so ist der Bemessungswert der Abschertragfähigkeit $F_{v,Rd}$ aller Verbindungsmittel mit einen Abminderungsbeiwert β_{Lf} abzumindern.“¹⁶</p>  <p>Abbildung 3 Lange Anschlüsse¹⁷</p>

¹⁴ vgl. DIN 18800-1 (2008), S. 25

¹⁵ vgl. DIN 18800-1 (2008), S. 72

¹⁶ vgl. DIN EN 1993-1-8 (2010), S. 34

¹⁷ vgl. DIN EN 1993-1-8 (2010), S. 34

Tabelle 5 Einteilung der Schrauben (eigene Darstellung)

DIN 18800-1		DIN EN 1993-1-8
Ausführungsformen		
Element 506		3.4
SL	Scher-Lochleibungsverbindung	<p>Kategorie A:</p> <p>Scher-/Lochleibungsverbindung</p> <p>„Keine Vorspannung erforderlich. Schrauben der Festigkeitsklasse 4.6 bis 10.9 dürfen verwendet werden.“¹⁸</p> <p>Kategorie B:</p> <p>Scherverbindung/ Gleitfeste Verbindung im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit</p> <p>„In der Regel sind hochfeste Schrauben der Festigkeitsklasse 8.8 oder 10.9 zu verwenden“¹⁹</p> <p>Kategorie C:</p> <p>Scherverbindung/ Gleitfeste Verbindung im Grenzzustand der Tragfähigkeit</p> <p>„In der Regel sind hochfeste Schrauben der Festigkeitsklasse 8.8 oder 10.9 zu verwenden.“²⁰</p>
SLP	Scher-Lochleibungs-Passverbindung	
SLV	Planmäßig vorgespannte Scher-Lochleibungsverbindung	
SLVP	Planmäßig vorgespannte Scher-Lochleibungs-Passverbindung	
GV	Gleitfeste, planmäßig vorgespannte Verbindung	

¹⁸ vgl. DIN EN 1993-1-8 (2010), S. 26

¹⁹ vgl. DIN EN 1993-1-8 (2010), S. 34

²⁰ vgl. DIN EN 1993-1-8 (2010), S. 34

Element 506	3.4
GVP Gleitfeste, planmäßig vorgespannte Passverbindung	<p>Kategorie D:</p> <p>Zugverbindung/ nicht vorgespannt</p> <p>„Keine Vorspannung erforderlich. Schrauben der Festigkeitsklasse 4.6 bis 10.9 dürfen verwendet werden.“²¹</p> <p>Kategorie E:</p> <p>Zugverbindung/ Vorgespannt</p> <p>„In der Regel sind hochfeste Schrauben der Festigkeitsklasse 8.8 oder 10.9 zu verwenden.“²²</p>

-

²¹vgl. DIN EN 1993-1-8 (2010), S. 34

²²vgl. DIN EN 1993-1-8 (2010), S. 34

Tabelle 6 Nennlochspiel_(eigene Darstellung)

DIN 18800-1		DIN EN 1090-2	
Nennlochspiel			
Element 506		DIN EN 1090-2 Tabelle 11	
Bei SL, SLV und GV Verbindungen gilt:		Normale Größe: ²³	
0,3 < Δd ≤ max. Δd		Nennlochspiel	Nenndurchmesser
bei SLP, SLVP und GVP Verbindungen gilt: Δd≤0,3		1,0 mm	M12, M14
für den Größtwert des Nennlochspiels max. Δd gilt:		2,0 mm	M16, M18, M20, M22, M24
		3,0 mm	≥ M 27
		Übergröße: ²⁴	
		Nennlochspiel	Nenndurchmesser
		3,0 mm	M12, M14
		4,0 mm	M16, M18, M20, M22
		6,0 mm	M24
		8,0 mm	≥ M 27

²³vgl. DIN EN 1090-2 (2008), S. 40

²⁴vgl. DIN EN 1090-2 (2008), S. 40

Tabelle 7 Zusammenwirken verschiedener Verbindungsmittel^(eigene Darstellung)

DIN 18800-1	DIN EN 1993-1-8
Zusammenwirken verschiedener Verbindungsmittel	
<p>Element 836</p> <p>„Werden verschiedene Verbindungsmittel in einem Anschluss oder Stoß verwendet, ist auf die Verträglichkeit der Formänderung zu achten. Gemeinsame Kraftübertragung darf angenommen werden bei:</p> <p>Nieten und Passschrauben oder GVP-Verbindungen und Schweißnähten oder Schweißnähten in einem oder in beiden Gurten und Nieten oder Passschrauben in allen übrigen Querschnittsteilen bei vorwiegender Beanspruchung durch Biegemoment M_y“²⁵</p>	<p>2.4</p> <p>„Werden zur Aufnahme von Scherbeanspruchungen verschiedene Verbindungsmittel mit unterschiedlichen Steifigkeiten verwendet, so ist in der Regel dem Verbindungsmittel mit der höchsten Steifigkeit die gesamte Belastung zuzuordnen. Eine Ausnahme von dieser Regel ist in 3.9.3 angegeben.“²⁶</p> <p>3.9.3</p> <p>„Als Ausnahme zu 2.4(3) kann der Gleitwiderstand von Verbindungen der Kategorie C in 3.4 mit vorgespannten Schrauben der Festigkeitsklassen 8.8 und 10.9 mit der Tragfähigkeit von Schweißnähten überlagert werden, vorausgesetzt, dass das endgültige Anziehen der Schrauben nach der vollständigen Ausführung der Schweißarbeiten erfolgt.“²⁷</p>

²⁵vgl. DIN 18800-1 (2008), S. 90

²⁶vgl. DIN EN 1993-1-8 (2010), S. 22

²⁷vgl. DIN EN 1993-1-8 (2010), S. 36

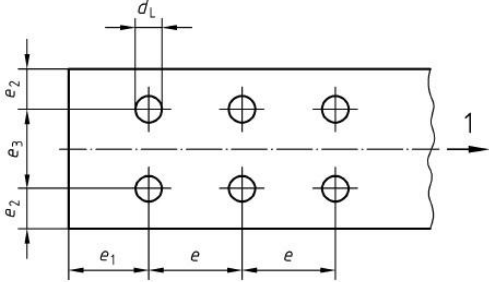
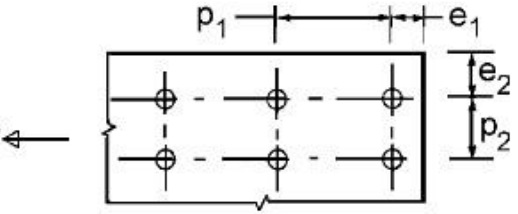
Tabelle 8 Schaftdurchmesser (eigene Darstellung)

DIN 18800-1	DIN EN 1090-2
Schaftdurchmesser	
<p>Element 506:</p> <p>„Für Schraubenverbindungen mit zugbeanspruchten Schrauben sind mindestens Schrauben der Größe M12 zu verwenden. Schrauben, Muttern und Scheiben kleiner M12 dürfen nur bei einem Ausnutzungsgrad auf Zug kleiner als 50 % verwendet werden. Schrauben kleiner als M6 sind für tragende Verbindungen nicht zulässig.“²⁸</p>	<p>8.2.2</p> <p>„Der Nenndurchmesser des Verbindungsmittels muss bei Stahlbauverschraubungen mindestens M12 sein, sofern, in Verbindungen mit den zugehörigen Anforderungen nichts anderes festgelegt wird.“²⁹</p>
<p>Sowohl für DIN 18800-1 als auch DIN EN 1090-2 gilt:</p> <p>Konstruktive Empfehlung des Schaftdurchmessers d:</p> $d \approx \sqrt{50 * \min t} - 2 \text{ [mm]}$	

²⁸ vgl. DIN 18800-1 (2008), S. 26

²⁹ vgl. DIN EN 1090-2 (2008), S. 60

Tabelle 9 Abstandsmaße (eigene Darstellung)

DIN 18800-1	DIN EN 1993-1-8
Abstandsmaße	
 <p>Abbildung 4 Schraubenabstand nach DIN 18800³⁰</p>	 <p>Abbildung 5 Schraubenabstand nach Eurocode³¹</p>
	<p>Die maximalen Werte gelten für Stahlkonstruktionen unter Verwendung der Stahlsorten nach DIN EN 10025, ausgenommen die Stahlsorten nach DIN EN 10025-5, die dem Wetter oder anderen korrosiven Einflüssen ausgesetzt sind³⁴.</p>

³⁰ vgl. DIN 18800-1 (2008), S. 29

³¹ vgl. DIN EN 1993-1-8 (2010), S.28

Tabelle 10 Schraubenrandabstände nach DIN³²

Randabstände		
Kleinsten Randabstand	In Krafrichtung e_1	$1,2 d_L$
	Rechtwinklig zur Krafrichtung e_2	$1,2 d_L$
Größter Randabstand	In und rechtwinklig zur Krafrichtung e_1 bzw. e_2	$3 d_L$ oder $6 t$

Tabelle 11 Schraubenlochabstände nach DIN³³

Lochabstände		
Kleinsten Lochabstand	In Krafrichtung e	$2,2 d_L$
	Rechtwinklig zur Krafrichtung e_3	$2,4 d_L$
Größter Lochabstand, e bzw. e_3	Zur Sicherung gegen lokales Beulen	$6 d_L$ oder $12 t$
	Wenn lokale Beulgefahr nicht besteht	$10 d_L$ oder $20 t$

Generelle Abstandsmaße sind:

Tabelle 12 Schraubenrandabstände nach Eurocode³⁵

Randabstand		
min	e_1	$1,2 * d_o$
	e_2	
max	e_1	$4t + 40 \text{ mm}$
	e_2	

Tabelle 13 Schraubenlochabstände nach Eurocode³⁶

Lochabstand		
min	p_1	$2,2 * d_o$
	p_2	$2,4 * d_o$
max	p_1	$\min \left\{ \begin{array}{l} 14 * t \\ 200 \text{ mm} \end{array} \right.$
	p_2	

t ist die Dicke des dünnsten außenliegenden Bleches in mm.

³⁴ vgl. Engelmann (2012), S. 4.7

³² vgl. DIN 18800-1 (2008), S. 29

³³ vgl. DIN 18800-1 (2008), S. 29

³⁵ vgl. Engelmann (2012), S. 4.7

³⁶ vgl. Engelmann (2012), S. 4.7

2.3 Vergleich Berechnungsmodel von Schrauben: DIN 18800-1 und DIN EN 1993-1-1 und 1-8

Tabelle 14 Gegenüberstellung wichtiger Formelzeichen (eigene Darstellung in Anlehnung an Auerswald (2009), S. 12 ff)

	DIN 18800-1	DIN EN 1993-1-1 und 1-8
Wichtige Formelzeichen		
Schaftdurchmesser	d_{Sch}	d
Lochdurchmesser	d_L	d_0
Bruttoquerschnittsfläche	A_{Sch}	A
Spannungsquerschnittsfläche	A_{Sp}	A_S
Anzahl der Scherflächen	m	n
Streckgrenze Schraube	$f_{y,b,k}$	f_{yb}
Streckgrenze Grundwerkstoff	f_y	f_y
Zugfestigkeit Schraube	$f_{u,b,k}$	f_{ub}
Zugfestigkeit Grundwerkstoff	f_u	f_u
Teilsicherheitsbeiwert	γ_M	γ_{M2}
Grenzabscherkraft	$V_{a,R,d}$	$F_{v,R,d}$
Grenzlochleibungskraft	$V_{l,R,d}$	$F_{b,R,d}$
Grenzzugkraft	$N_{R,d}$	$F_{t,R,d}$
Grenzdurchstanzkraft	-----	$B_{p,R,d}$

Tabelle 15 Abscheren³⁷

DIN 18800-1	DIN EN 1993-1-1 und 1-8
Abscheren	
$V_{a,R,d} = A * m * \alpha_a * \frac{f_{u,b,k}}{\gamma_M}$ $\frac{V_a}{V_{a,R,d}} \leq 1$	$F_{v,Rd} = n * \frac{\alpha_v * f_{ub} * A}{\gamma_{M2}}$ $\frac{F_v}{F_{v,Rd}} \leq 1$
$\gamma_M = 1,1$ m = Schnittigkeit der Verbindung	$\gamma_{M,2} = 1,25$ n = Schnittigkeit
$\alpha_a = 0,6$ für Schrauben der Festigkeitsklassen 4.6, 5.6 und 8.8 $\alpha_a = 0,55$ für Schrauben der Festigkeitsklasse 10.9 und Abscheren des Schaftes $\alpha_a = 0,44$ für Schrauben der Festigkeitsklasse 10.9 und Abscheren des Gewindes	$\alpha_v = 0,6$ bei abgesicherten Schaft und allen Festigkeitsklassen $\alpha_v = 0,6$ bei abgesicherten Gewinde und den Festigkeitsklassen 4.6, 5.6 und 8.8 $\alpha_v = 0,5$ bei abgesicherten Gewinde und den Festigkeitsklassen 4.8, 5.8, 6.8 und 10.9
A = A _{Schh} wenn der Schaft abschert A = A _{Sp} wenn das Gewinde abschert	A = A wenn der Schaft abschert A = A _S wenn das Gewinde abschert
f _{u,b,k} ist nach Anlage 1 zu ermitteln A _{Sch} und A _{Sp} ist nach Anlage 2 zu ermitteln.	f _{u,b} ist nach Anlage 1 zu ermitteln A _{Sch} und A _{Sp} ist nach Anlage 2 zu ermitteln.

³⁷ vgl. Engelmann (2012), S. 4.11

Tabelle 16 Lochleibung (eigene Darstellung)

DIN 18800-1 ³⁸	DIN EN 1993-1-1 und 1-8 ³⁹
Lochleibung	
$V_{l,R,d} = t * d * \sigma_{l,R,d}$ $\sigma_{l,R,d} = \alpha_1 * \frac{f_{y,k}}{\gamma_M}$ $V_{l,R,d} = t * d * \alpha_1 * \frac{f_{y,k}}{\gamma_M}$ $\frac{V_l}{V_{l,R,d}} \leq 1$	$F_{b,Rd} = k_1 * \alpha_b * d * t * \frac{f_u}{\gamma_{M2}}$ $\frac{F_b}{F_{b,Rd}} \leq 1$
<p>Wenn $e_2 \geq 1,5 * d_L$ und $e_3 \geq 3,0 * d_L$ gilt:</p> $\alpha_1 = \min \begin{cases} 1,10 * \frac{e_1}{d_L} - 0,3 \\ 1,08 * \frac{e}{d_L} - 0,77 \end{cases}$	$\gamma_{M2} = 1,25$ $\alpha_b = \min \begin{cases} \frac{\alpha_d}{f_{ub}} \\ \frac{f_u}{1,0} \end{cases}$
<p>Wenn $e_2 = 1,2 * d_L$ und $e_3 = 2,4 * d_L$ gilt:</p> $\alpha_1 = \min \begin{cases} 0,73 * \frac{e_1}{d_L} - 0,2 \\ 0,72 * \frac{e}{d_L} - 0,51 \end{cases}$	<p>Ermittlung Beiwert k_1 quer zur Kraftrichtung liegende Schrauben am Rand gilt:</p> $k_1 = \min \begin{cases} 2,8 * \frac{e_2}{d_0} - 1,7 \\ 1,4 * \frac{p_2}{d_0} - 1,7 \\ 2,5 \end{cases}$ <p>Innen gilt:</p> $k_1 = \min \begin{cases} 1,4 * \frac{p_2}{d_0} - 1,7 \\ 2,5 \end{cases}$

³⁸ vgl. DIN 18800-1(2008), S. 73 ff

³⁹ vgl. DIN EN 1993-1-8 (2010), S.31

	<p>Ermittlung Beiwert α_d</p> <p>In Krafrichtung liegende Schrauben am Rand gilt:</p> $\alpha_d = \frac{e_1}{3 * d_0}$ $e_1 \geq 1,2 * d_0$ <p>Innen gilt:</p> $\alpha_d = \frac{p_1}{3 * d_0} - 0,25$ $p_1 \geq 2,2 * d_0$
$f_{u,k}$ ist nach Anlage 2 zu ermitteln.	f_u ist nach Anlage 2 zu ermitteln.

Tabelle 17 Zug (eigene Darstellung)

DIN 18800-1 ⁴⁰	DIN EN 1993-1-1 und 1-8 ⁴¹
Zug	
$N_{R,d} = \min \left\{ \begin{array}{l} A_{Sch} * \sigma_{1,R,d} \\ A_{Sp} * \sigma_{2,R,d} \end{array} \right.$	$F_{t,Rd} = k_2 * \frac{f_{ub}}{\gamma_{M''}} * A_s$
$\sigma_{1,R,d} = \frac{f_{y,b,k}}{1,1 * \gamma_M}$ $\sigma_{2,R,d} = \frac{f_{u,b,k}}{1,25 * \gamma_M}$ $\gamma_M = 1,1$	$k_2 = 0,9$ bei Senkkopfschrauben 0,63 $\gamma_{M2} = 1,25$
$f_{y,b,k}$ ist nach Anlage 1; A_{Sch} und A_{Sp} ist nach Anlage 2 zu ermitteln.	f_{ub} ist nach Anlage 1; A_s ist nach Anlage 2 zu ermitteln.

⁴⁰ vgl. DIN 18800-1(2008), S. 75 ff

⁴¹ vgl. DIN EN 1993-1-8 (2010), S.31

Tabelle 18 Durchstanzen (eigene Darstellung in Anlehnung an Engelmann (2012), S. 4.13)

DIN 18800-1	DIN EN 1993-1-1 und 1-8
Durchstanzen	
Dieser Versagensfall ist in der DIN 18800 nicht geregelt.	$B_{p,R,d} = 0,6\pi * d_m * t_p * \frac{f_u}{\gamma_{M2}}$
	$\frac{F_{t,Ed}}{B_{p,Rd}} \leq 1$ $d_m = \frac{e + s}{2}$ <p>d_m = Mittelwert aus Schlüsselweite s und dem Eckmaß $\min e$ der Mutter oder des Schraubenkopfes.</p> <p>t_p = Blechdicke unter Mutter oder Schraubenkopf.</p> <p>$\gamma_{M2} = 1,25$</p> <p>f_u ist nach Anlage 3 zu ermitteln</p>

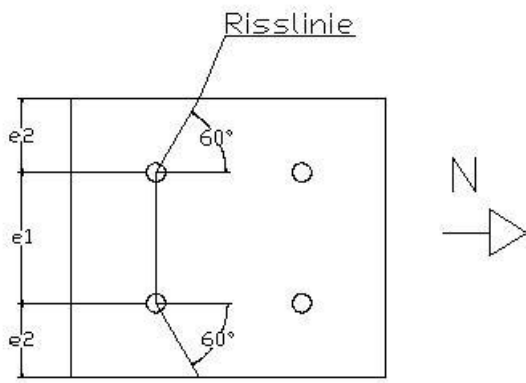
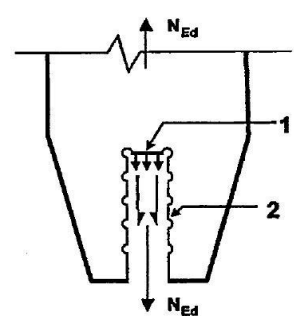
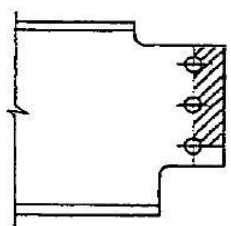
Tabelle 19 Zug und Abscheren^(eigene Darstellung)

<div> DIN 18800-1⁴² DIN EN 1993-1-1 und 1-8⁴³ </div>	
Zug und Abscheren	
<p>Interaktion:</p> $\left[\frac{N}{N_{R,d}} \right]^2 + \left[\frac{V_a}{V_{a,R,d}} \right]^2 \leq 1$	<p>Interaktion:</p> $\frac{F_{v,Ed}}{F_{v,Rd}} + \frac{F_{t,Ed}}{1,4 * F_{t,Rd}} \leq 1$
<p>Hinweis:</p> <p>Der Nachweis der Interaktion darf entfallen, wenn:</p> $\frac{N}{N_{R,d}} < 0,25 \text{ oder } \frac{V_a}{V_{a,R,d}} < 0,25$	

⁴²vgl. DIN 18800-1(2008), S. 76 ff

⁴³vgl. DIN EN 1993-1-8 (2010), S.33

Tabelle 20 Risslinie/Blockversagen

DIN 18800-1	DIN EN 1993-1-1 und 1-8
Risslinie	Blockversagen
 <p>Abbildung 6 Risslinie(eigene Darstellung)</p> $\frac{\sigma_d}{\sigma_{R,d}} \leq 1$	<p>Bei zentrischer Belastung:</p> $V_{\text{eff},1,R,d} = A_{nt} * \frac{f_u}{\gamma_{M2}} + A_{nv} * \frac{f_y}{\sqrt{3} * \gamma_{M0}}$  <p>Abbildung 7 Zentrische Belastung⁴⁴</p> <p>Erläuterung zum Bild: 1 = A_{nt} 2 = A_{nv}</p>
$\sigma_d = \frac{N}{A_{\text{Netto}}}$ $A_{\text{Netto}} = \left(\left(e_1 + 2 * \frac{e_2}{\sin 60^\circ} \right) - 2 * d_0 \right) * t$ <p>t = Dicke Blech</p> <p>wenn $\frac{A_{\text{Brutto}}}{A_{\text{Netto}}} < 1,2$, darf der Nachweis mit A_{Brutto} geführt werden</p>	<p>Bei exentrischer Belastung:</p> $V_{\text{eff},2,R,d} = 0,5 * A_{nt} * \frac{f_u}{\gamma_{M2}} + A_{nv} * \frac{f_y}{\sqrt{3} * \gamma_{M0}}$  <p>Abbildung 8 Exentrische Belastung⁴⁵</p>

⁴⁴vgl. Petersen (2012), S. 34

$\sigma_{R,d} = \frac{f_{u,k}}{\gamma_f * \gamma_M}$	$A_{nt} = \text{zugbeanspruchte Netto} \\ \text{– Querschnittsfläche}$ $A_{nv} = \text{schubbeanspruchte Netto} \\ \text{– Querschnittsfläche}$
$\gamma_f = 1,25$ $\gamma_M = 1,1$	$\gamma_{M0} = 1,0$ $\gamma_{M2} = 1,25$
$f_{u,k}$ ist nach Anlage 2 zu ermitteln.	f_y ist nach Anlage 2 zu ermitteln. f_u ist nach Anlage 2 zu ermitteln.

⁴⁵vgl. Petersen (2012), S. 35

3 Schweißverbindung

Im dritten Kapitel meiner Bachelorarbeit liegt der Fokus auf der Schweißverbindung. Einleitend wird ein kleiner Überblick über die verschiedenen Schweißverfahren, Schweißnahtformen und Schweißpositionen gegeben. Es folgt ein kurzer tabellarischer Vergleich von ausgewählten konstruktiven Aspekten der gegenübergestellten Normenwerke. Um die theoretischen Grundlagen der Rechenmethoden erläutern zu können, werden sowohl die Rechenmodelle als auch Berechnungskonzepte von DIN und Eurocode erklärt.

3.1 Allgemeines

Tabelle 21 Definition Schweißen

Definition Schweißen:

„Ein Vorgang, der Werkstoff(e) unter Anwendung von Wärmeenergie und/oder Druck derart vereinigt, dass sich ein kontinuierlicher innerer Aufbau der verbindenden Werkstoffe ergibt. Schweißzusatz, dessen Schmelztemperatur von gleicher Größenordnung ist wie der (des) Grundwerkstoffe(s), kann zugeführt werden. Das Ergebnis des Schweißens ist die Schweißnaht.“⁴⁶

Die bedeutendste nicht lösbare Verbindung im Stahlbau ist die Schweißverbindung. Relevante Schweißverfahren im Stahlbau sind das Elektrohandschweißen, das Schutzgasschweißen sowie der automatisierte Prozess des Unterpulverschweißens.⁴⁷

⁴⁶ vgl. Gesellschaft für Schweißtechnik International mbH (2011), Kapitel 1.01 S.1

⁴⁷ vgl. Wagenknecht (2012), S. 48 ff

Tabelle 22 Schweißverfahren im Stahlbau (eigene Darstellung in Anlehnung an Wagenknecht (2011), S. 48)

Herstellung	Elektrohandschweißen	Schutzgas-schweißen	Unterpulver-schweißen
Gerät	Elektrodenhalter	Schweißpistole	Schweißwagen
Führung	Von Hand	Von Hand	Automatisch
Elektrode	Stabelektrode, umhüllt $\approx 3\text{-}5\text{mm } \varnothing$	Drahtelektrode blank, endlos $\approx 1\text{mm } \varnothing$	Drahtelektrode endlos
Vorschub der Elektrode	Von Hand	Automatisch	Automatisch
Schutz der Schweißstelle	Abschmelzende Umhüllung bildet Gas und Schlacke	Schutzgas strömt aus der Pistole; CO_2 , Mischgas	Schweißpulver schmilzt und bildet Schlacke
Anmer-kung	Schlacke muss entfernt werden, Elektrodenwechsel	Höhere Abschmelzleistung als bei Handschweißung	Nur für lange, waagerechte Nähte, große Dicken möglich

In Abhängigkeit von der Lage der Naht unterscheidet man verschiedene Schweißpositionen. Die Wannenlage und horizontale Lage werden als Normallage bezeichnet. Senkrecht fallende, senkrecht steigende, über Kopf oder quer hergestellte Nähte bezeichnet man als Zwangsposition. Die Kehlnaht und Stumpfnäht sind die wichtigsten im Stahlbau. Hierbei erfordern Stumpfnähte meist eine Nahtkantenvorbereitung, welche durch das Abfasen der Bleche realisiert wird. Des Weiteren unterscheidet man Schweißnähte hinsichtlich ihrer Ein- und Mehrlagigkeit.

Der Sprödbbruch ist eines der größten Probleme der Schweißverbindungen. Er kann bereits bei geringer Spannung entstehen und zeichnet sich durch keinerlei Vorwarnungen aus. Ein weiteres Problem bei Schweißverbindungen ist der Terrassenbruch, ein Versagen des Grundwerkstoffes. Durch nichtmetallische Einschlüsse beim Walzen kann es vorkommen, dass bei Zugbeanspruchung Brüche parallel zur Oberfläche entstehen. Durch konstruktive Maßnahmen und die Wahl eines geeigneten Werkstoffes, kann die Gefahr des Terrassenbruches reduziert werden.

Um die Qualität der Schweißarbeiten zu optimieren wird versucht, die Herstellung von Schweißnähten auf der Baustelle zu vermeiden. Äußere Einflüsse wie Regen, Wind und extreme Temperaturen lassen sich dort nur schwer vermeiden und wirken sich negativ auf das Schweißergebnis aus. Des Weiteren ist es bei Baustellenschweißungen oft nicht gewährleistet, dass der Schweißer Zwangslagen vermeiden kann. Aufgrund des behinderten Abkühlprozesses des Bauteils entstehen Schrumpfungsspannungen und Verzug. Dieser kann durch einen günstigen Schweißfolgeplan, symmetrisches zur Stabachse angeordnete Nähte, Vermeidung von Nahtanhäufungen und einer optimal gewählten Schweißnahtdicke reduziert werden.⁴⁸

⁴⁸vgl. Wagenknecht (2012), S. 48 ff

3.2 Vergleich Anwendungshinweise von Schweißnähten: DIN 18800-1 und DIN EN 1993-1-1 und 1-8

Tabelle 23 Konstruktive Festlegungen von Schweißnähten (eigene Darstellung in Anlehnung an Auerswald (2009), S. 44)

	DIN 18800-1	DIN EN 1993-1-1 und 1-8
Konstruktive Festlegungen		
Mindestblechdicke	$t \geq 3\text{mm}^{49}$	$t \geq 4\text{mm}^{50}$
Minimal wirksame Kehlnahtlänge	$l \geq 6 * a$ $l \geq 30\text{mm}$	$L_w \geq 6 * a_w$ $L_w \geq 30\text{mm}$
Maximal wirksame Kehlnahtlänge	für S235/S275/S355: $l \geq 150 * a$ Für S420/S450/S460: $l \geq 100 * a$	$L_w \leq 150 * a_w$ Sonst wird Grenzkraft mit β_{Lw} abgemindert $\beta_{Lw} = 1,2 - \frac{0,2 * L_j}{(150 * a_w)}$ $\beta_{Lw} \leq 1,0$
Grenzwert für Kehlnahtdicke	$2\text{mm} \leq a \leq 0,7 * \min t$ $a \geq \sqrt{\max t} - 0,5$	$3\text{mm} \leq a_w \leq 0,7 * t_{\min}$ $a_w \geq \sqrt{\max t} - 0,5$
Wirksame Nahtfläche	$A_w = \sum a * l$	$A_w = \sum a_w * l_{\text{eff}}$ die wirksame Länge l_{eff} besteht aus der Gesamtlänge in voller Nahtdicke abzüglich $2 * a$
Teilsicherheitsbeiwert	$\gamma_M = 1,1$	$\gamma_{M,2} = 1,25$
Korrelationsbeiwert	nicht vorhanden	β_w

⁴⁹vgl. DIN 18800-1(2008), S. 11

⁵⁰vgl. DIN EN 1993-1-8 (2010), S.42

Ermittlung
Nahtdicke

Stumpfnah:

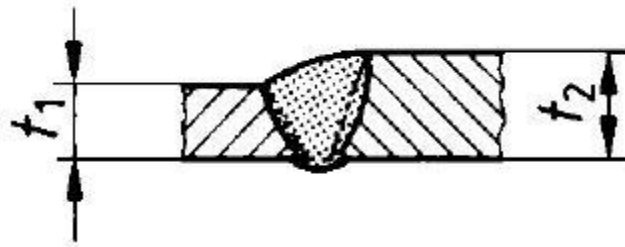


Abbildung 9 Nahtdicke Stumpfnah⁵¹

$$a = \min t = t_1$$

Kehlnah:

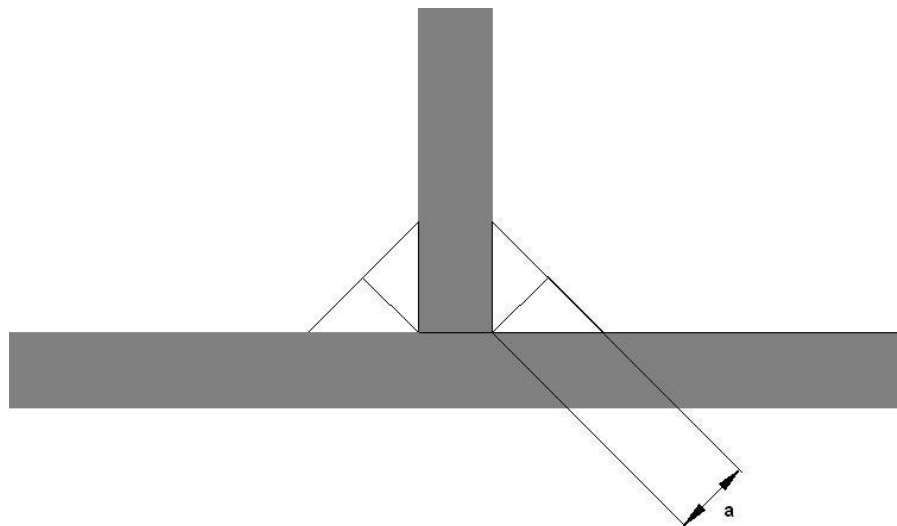


Abbildung 10 Nahtdicke Kehlnah (eigene Darstellung)

⁵¹vgl. DIN 18800-1(2008), S. 37

3.3 Vergleich Berechnungsmodel von Schweißnähten: DIN 18800-1 und DIN EN 1993-1-1 und 1-8

3.3.1 Berechnung nach DIN 18800-1

3.3.1.1 Stumpfnah

Anhand der Stumpfnah soll die Berechnung der Beanspruchung einer Schweißnah erklärt werden.⁵²

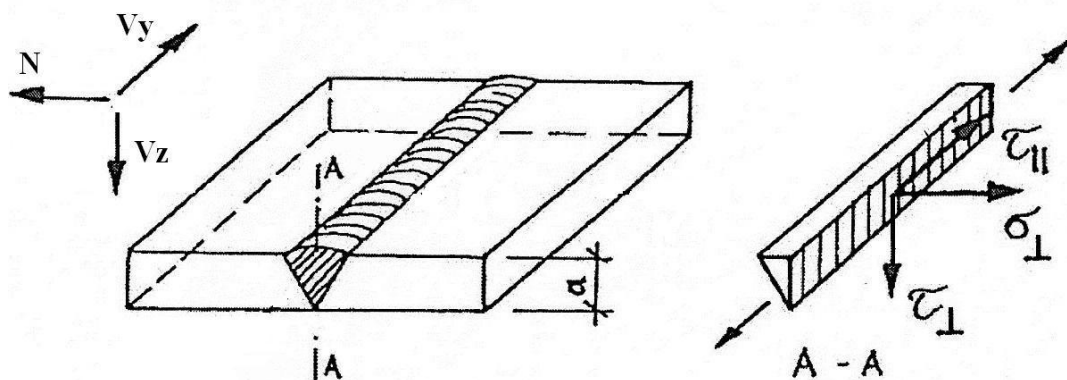


Abbildung 11 Berechnungsmodell Stumpfnah (eigene Darstellung in Anlehnung an Laufs (2009) s.4/44)

Das Modell der Schweißnah unterscheidet sich von der realen Stumpfnah nur darin, dass die in der Realität gewölbte Naht im Modell als flache Naht angenommen wird. Die im Berechnungsmodell gezeigten äußeren Einflüsse N , V_x und V_y verursachen in der Schweißnah eine Spannung. Dabei wirkt σ_{\perp} senkrecht auf die Schweißnahfläche, τ_{\perp} quer zur Naht und τ_{\parallel} in Längsrichtung der Schweißnah. Die Spannung ist zu errechnen, indem man den äußeren Einfluss durch die Schweißnahfläche A_w teilt.⁵³

Jede äußere Kraft bildet eine dazugehörige Spannung.

⁵²vgl. Wagenknecht (2012), S. 58 f

⁵³vgl. Wagenknecht (2009), S. 58 f

Tabelle 24 Spannungen und äußere Einflüsse nach DIN 18800 (eigene Darstellung)

Spannung	Beanspruchung	Formel ⁵⁴
σ_{\perp}	N	$\sigma_{\perp} = \frac{N}{A_w}$
τ_{\perp}	V_z	$\tau_{\perp} = \frac{V_z}{A_w}$
τ_{\parallel}	V_y	$\tau_{\parallel} = \frac{V_y}{A_w}$

Tabelle 25 Nachweis einer Stumpfnahht nach DIN⁵⁵

Nachweise
$\frac{\sigma_{\perp}}{\sigma_{w,R,d}} \leq 1$
$\frac{\tau_{\perp}}{\sigma_{w,R,d}} \leq 1$
$\frac{\tau_{\parallel}}{\sigma_{w,R,d}} \leq 1$
$\frac{\sigma_{w,v}}{\sigma_{w,R,d}} \leq 1$
<p>wobei:</p> $\sigma_{w,v} = \sqrt{\sigma_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2 + \tau_{\perp}^2}$

⁵⁴vgl. Wagenknecht (2009), S. 59

⁵⁵vgl. DIN 18800-1(2008), S. 82

Tabelle 26 Grenzschweißnahtspannung⁵⁶

Grenzschweißnahtspannung																												
$\sigma_{wR,d} = \alpha_w * \frac{f_{y,k}}{\gamma_M}$																												
$\gamma_M = 1,1$																												
$f_{y,k}$ ist aus Anlage 3 zu entnehmen																												
<p>Ermittlung Beiwert α_w:</p> <p>Tabelle 27 α_w Beiwert (eigene Darstellung in Anlehnung an Engelmann (2012), S. 4.50)</p> <table> <tr> <th rowspan="2">Nahtart</th><th rowspan="2">Beanspruchungsart</th><th colspan="4">Baustahl</th></tr> <tr> <th>S 235</th><th>S 275</th><th>S 355</th><th>S 420/ S 460</th></tr> <tr> <td rowspan="2">Stumpfnah</td><td>Druck</td><td>1,0</td><td>1,0</td><td>1,0</td><td>1,0</td></tr> <tr> <td>Zug, Schub</td><td rowspan="2">0,95</td><td rowspan="2">0,85</td><td rowspan="2">0,80</td><td rowspan="2">0,70</td></tr> <tr> <td>Kehlnah</td><td>Druck, Zug Schub</td></tr> </table>						Nahtart	Beanspruchungsart	Baustahl				S 235	S 275	S 355	S 420/ S 460	Stumpfnah	Druck	1,0	1,0	1,0	1,0	Zug, Schub	0,95	0,85	0,80	0,70	Kehlnah	Druck, Zug Schub
Nahtart	Beanspruchungsart	Baustahl																										
		S 235	S 275	S 355	S 420/ S 460																							
Stumpfnah	Druck	1,0	1,0	1,0	1,0																							
	Zug, Schub	0,95	0,85	0,80	0,70																							
Kehlnah	Druck, Zug Schub																											

⁵⁶ vgl. Laufs (2009), S. 4/ 44

3.3.1.2 Kehlnaht

Auch hier wird ein Modell zur Hilfe genommen, um die Berechnungen zu erleichtern. Als erstes wird hierbei ein Freischnitt an der kleinsten Schweißnahtfläche durchgeführt. Dadurch entstehen bei einer doppelten Kehlnaht zwei gleichschenklige Dreiecke mit der Kehlnahtdicke a .

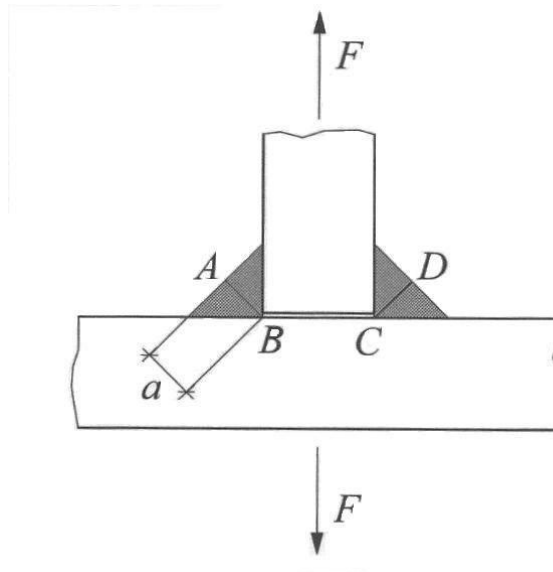


Abbildung 12 Berechnungsmodell Kehlnaht DIN⁵⁷

Verursacht durch äußere Einfluss entstehen Spannungen in der Schweißnaht. Anhand dieser ermittelten Spannungen wird der Nachweis durchgeführt.

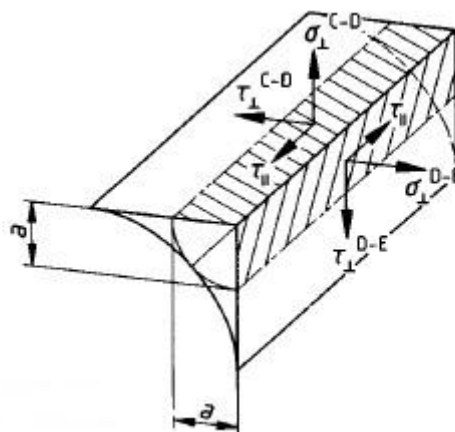


Abbildung 13 Schweißnahtspannungen Kehlnaht⁵⁸

⁵⁷vgl. Wagenknecht (2009) S.60

Tabelle 28 Nachweise einer Kehlnacht nach DIN⁵⁹

Nachweise	
	$\frac{\sigma_{\perp}}{\sigma_{w,R,d}} \leq 1$
	$\frac{\tau_{\perp}}{\sigma_{w,R,d}} \leq 1$
	$\frac{\tau_{\parallel}}{\sigma_{w,R,d}} \leq 1$
	$\frac{\sigma_{w,v}}{\sigma_{w,R,d}} \leq 1$
wobei:	$\sigma_{w,v} = \sqrt{\sigma_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2 + \tau_{\perp}^2}$
$\sigma_{w,R,d}$ ist nach Tabelle 22 zu ermitteln.	

⁵⁸ vgl. DIN 18800-1(2008), S. 87

⁵⁹ vgl. Engelmann (2012), S. 4.48

3.3.2 Berechnung nach DIN EN 1993-1-1 und 1-8/NA

3.3.2.1 Richtungsbezogenes Verfahren

In der DIN EN 1993 gibt es zwei geregelte Varianten, eine Kehlnaht zu berechnen. Eine Methode ist das richtungsbezogene Verfahren und die zweite Variante ist das vereinfachte Verfahren.

Im richtungsbezogenen Verfahren dienen die Spannungen als Nachweisgrundlage. Im Modell werden hierfür die Spannungen in die wirksame Nahtfläche projiziert und in der Wurzellinie konzentriert.

Es wird eine Vergleichsspannung gebildet, die aus der Überlagerung der Spannungsanteile entsteht.

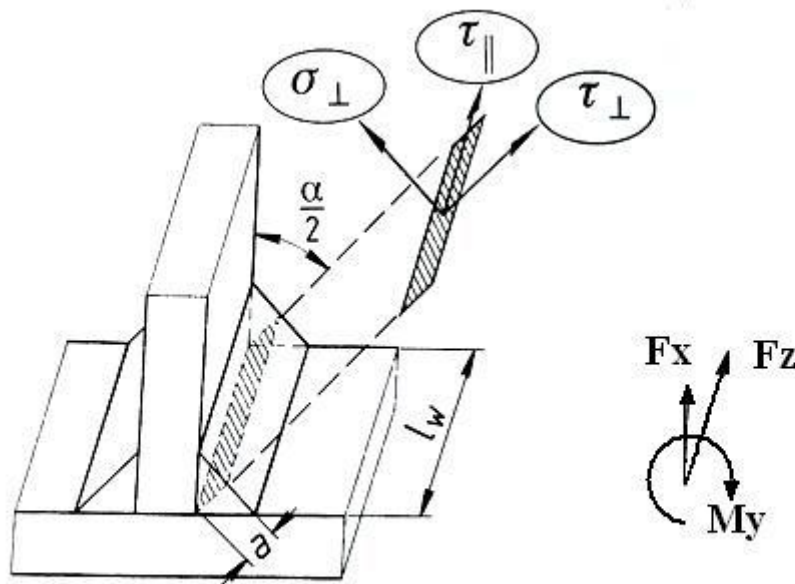


Abbildung 14 Berechnungsmodell richtungsbezogenes Verfahren (eigene Darstellung in Anlehnung an Engelmann (2012), S4.48)

Tabelle 29 Einwirkung durch Schub längs der Naht⁶⁰

Beanspruchung	Spannung
$F_{z,Ed}$	$\tau_{\parallel} = \frac{F_{z,Ed}}{\sum a * l_w}$

Tabelle 30 Einwirkung Zug/Druck quer zur Naht⁶¹

Beanspruchung	Spannung
$F_{x,Ed}$	$\sigma_{\perp} = \frac{F_{x,Ed}}{\sum a * l_w} * \sin \frac{\alpha}{2}$ $\tau_{\perp} = \frac{F_{x,Ed}}{\sum a * l_w} * \cos \frac{\alpha}{2}$
$M_{y,Ed}$	$\sigma_{\perp} = \frac{M_{y,Ed}}{\sum a * \frac{l_w^2}{6}} * \sin \frac{\alpha}{2}$ $\tau_{\perp} = \frac{M_{y,Ed}}{\sum a * \frac{l_w^2}{6}} * \cos \frac{\alpha}{2}$

⁶⁰vgl. Engelmann (2012), S. 4.49

⁶¹vgl. Engelmann (2012), S. 4.49

Tabelle 31 Nachweis richtungsbezogenes Verfahren⁶²

Nachweis
$\frac{\sigma_{wv,Ed}}{\sigma_{wv,Rd}} \leq 1$
$\frac{\sigma_{\perp}}{\sigma_{\perp w,Rd}} \leq 1$
<p>wobei:</p> $\sigma_{wv,Ed} = \sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3 * (\tau_{\parallel}^2 + \tau_{\perp}^2)}$

Tabelle 32 Ermittlung $\sigma_{\perp w,Rd}$ ⁶³

Ermittlung $\sigma_{\perp w,Rd}$
$\sigma_{\perp w,Rd} = 0,9 * \frac{f_u}{\gamma_{M2}}$
$\gamma_{M2}=1,25$
f_u ist nach Anlage 3 zu ermitteln.

⁶²vgl. DIN EN 1993-1-8 (2010), S.47 ff

⁶³vgl. DIN EN 1993-1-8 (2010), S.47 ff

Tabelle 33 Ermittlung $\sigma_{wv,Rd}$ ⁶⁴

Ermittlung $\sigma_{wv,Rd}$				
$\sigma_{wv,Rd} = \frac{f_u}{\beta_w * \gamma_{M2}}$				
$\gamma_{M2}=1,25$				
f_u ist nach Anlage 3 zu ermitteln.				
Ermittlung Beiwert β_w : Tabelle 34 Korrelationsbeiwert ⁶⁵				
Profil:	Baustahl			
	S 235	S 275	S 355	S 420/ S 460
Walzprofil	0,80	0,85	0,9	1,0
Hohlprofil- kalt gefertigt				
Hohlprofil- warm gefertigt				

⁶⁴vgl. Engelmann (2012), S. 4.50 f

⁶⁵vgl. Engelmann (2012), S. 4.50

3.3.2.2 Vereinfachtes Verfahren

Im vereinfachten Verfahren dienen die Schnittkräfte als Nachweisgrundlage.

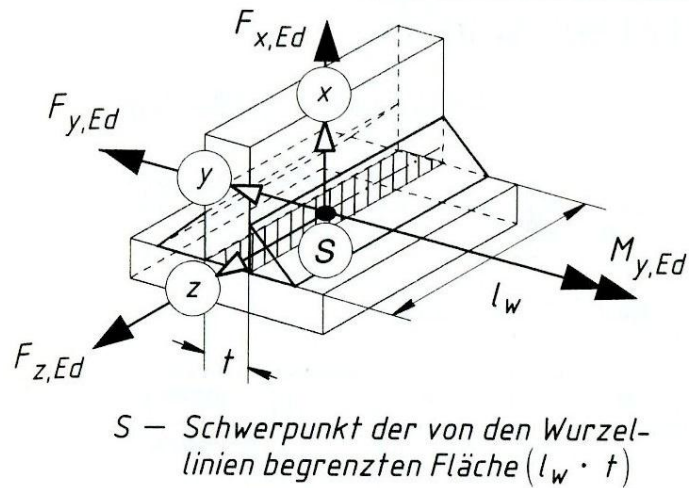


Abbildung 15 Berechnungsmodell Vereinfachtes Verfahren 1⁶⁶

Alle angreifenden Beanspruchungen werden in den Schwerpunkt S der Schweißnaht übertragen und in orthogonale Komponenten zerlegt. Sie werden auf das Nahtelement l_w der Länge 1 bezogen.

Am Ende wird eine Vergleichskraft ermittelt, die sich aus der Überlagerung der bezogenen Schnittkraftanteile bildet.

⁶⁶vgl. Engelmann (2012), S. 4.49

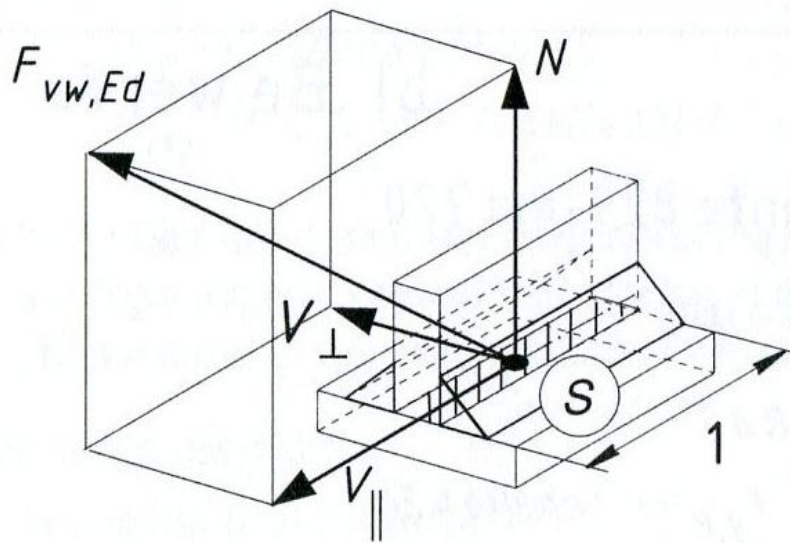


Abbildung 16 Berechnungsmodell Vereinfachtes Verfahren 2⁶⁷

Tabelle 35 Vereinfachtes Verfahren/ Einwirkungen⁶⁸

Beanspruchungen
$N = \frac{F_{x,Ed}}{l_w} \pm \frac{M_{y,Ed}}{\frac{l_w^2}{6}}$ $V_{\perp} = \frac{F_{y,Ed}}{l_w}$ $V_{\parallel} = \frac{F_{z,Ed}}{l_w}$

⁶⁷ vgl. Engelmann (2012), S. 4.49

⁶⁸ vgl. Engelmann (2012), S. 4.49

Tabelle 36 Vereinfachtes Verfahren/ Nachweis⁶⁹

Nachweis
$\frac{F_{wv,Ed}}{F_{wv,Rd}} \leq 1$ <p>wobei:</p> $F_{vw,Ed} = \sqrt{N^2 + V_{\perp}^2 + V_{\parallel}^2}$

Tabelle 37 Ermittlung $F_{vw,Rd}$ ⁷⁰

Ermittlung $F_{vw,Rd}$
$F_{vw,Rd} = \sum \frac{a}{\sqrt{3}} * \frac{f_u}{\beta_w * \gamma_{M2}}$
$\gamma_{M2} = 1,25$
f_u ist aus Anlage 3 zu entnehmen

⁶⁹vgl. Engelmann (2012), S. 4.53

⁷⁰vgl. Engelmann (2012), S. 4.52

4 Vergleichsrechnung Stirnplatte

In diesem Teil der Bachelorarbeit soll anhand von einem gelenkigen Doppelwinkelanschluss, der zuerst nach DIN 18800 und anschließend nach Eurocode berechnet wurde, die Abweichungen der Regelwerke durch Berechnungen aufgezeigt werden. Zum Vergleich werden die Ergebnisse der einzelnen Nachweise tabellarisch gegenübergestellt. Um Rückschlüsse auf die Ursache der eventuellen Abweichungen schließen zu können, wurde zwei Varianten des Anschlusses herangezogen. Variante 2 differiert in Profilabmessung, Schraubengröße, Schraubenabständen und Schweißnahtdicken erheblich. So soll eine eventuelle Abhängigkeit der Ergebnisse von Materialdicken sichtbar werden.

4.1 Stirnplattenvariante 1

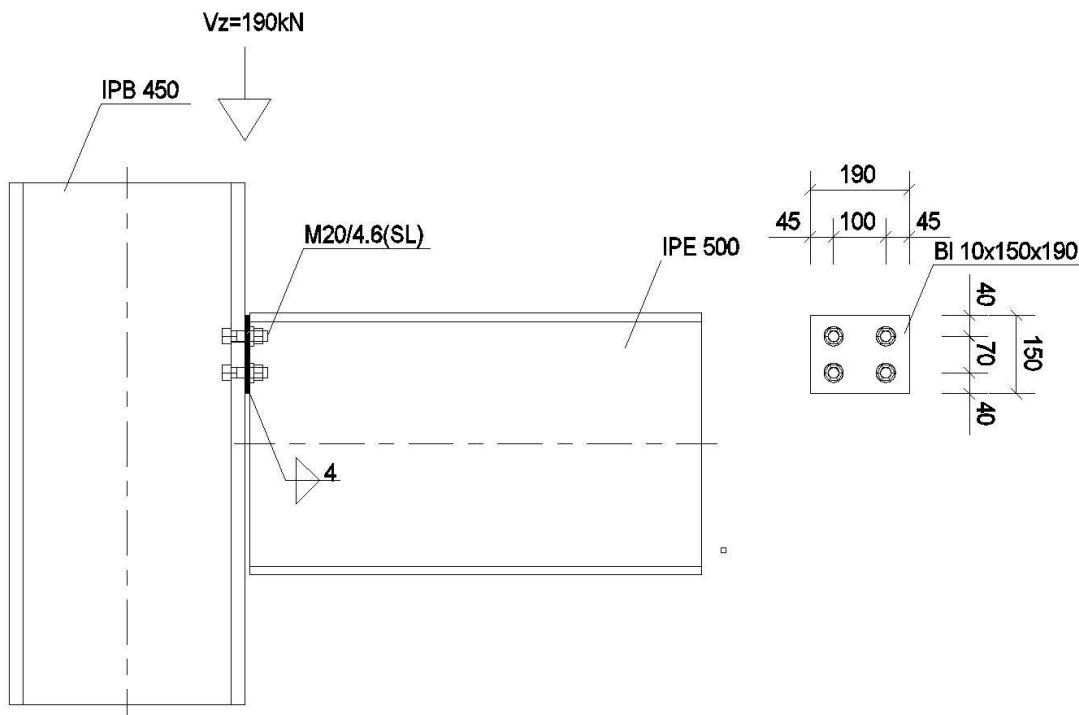


Abbildung 17 Stirnplattenanschluss Variante 1

4.1.1 Stirnplatte 1 nach DIN

4.1.1.1 Untersuchung des Trägertseges

IPE 500 DIN 1025 T5 S235

gegeben:

Profilabmessungen:

$$b = 200\text{mm}$$

$$t = 16\text{mm}$$

$$h_1 = 426\text{mm}$$

$$s = 10,2\text{mm}$$

$$V_z = 190\text{ kN}$$

$$f_{y,k} = 240 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$A_{\text{Gurt}} = b * t = 200\text{mm} * 16\text{ mm} = 3200\text{mm}^2$$

$$A_{\text{Steg}} = h_1 * s = 426\text{mm} * 10,2\text{ mm} = 4345,2\text{mm}^2$$

$$A_{\text{Steg/Stirnplatte}} = h_{\text{Stirnplatte}} * s = 150\text{mm} * 10,2\text{ mm} = 1530\text{mm}^2 \text{ (Schnitt neben Stirnplatte in Trägersteg)}$$

Nachweisführung:

$$\text{wenn } \frac{A_{\text{Gurt}}}{A_{\text{Steg}}} > 0,6 \text{ dann gilt, } \tau = \frac{V_z}{A_{\text{Steg/Stirnplatte}}}$$

$$\frac{A_{\text{Gurt}}}{A_{\text{Steg}}} = \frac{3200\text{mm}^2}{4345,2\text{mm}^2} = 0,73 > 0,6$$

$$\tau = \frac{V_z}{A_{\text{Steg/Stirnplatte}}} = \frac{190 * 10^3\text{N}}{1530\text{mm}^2} = 124 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$\tau_{R,d} = \frac{f_{y,k}}{\sqrt{3} * \gamma_M} = \frac{240 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}}{\sqrt{3} * 1,1} = 126 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$\frac{\tau}{\tau_{R,d}} = \frac{124 \frac{N}{mm^2}}{126 \frac{N}{mm^2}} = \underline{0,98 < 1,0} \quad \text{Nachweis erfüllt}$$

maximal aufnehmbare Kraft des Trägersteges

$$V_{z,max} = \tau_{R,d} * A_{\text{Steg-Stirnplatte}} = 126 \frac{N}{mm^2} * 1530 mm^2 = 192,78 kN$$

4.1.1.2 Nachweis Schweißnaht, Verbindung Trägersteg-Stirnplatte

Überprüfung der Nahtgeometrie nach DIN 18800 T1

$$2mm \leq a = 4mm < 0,7 * \min t = 0,7 * 10 = 7mm$$

$$> \sqrt{\max t} - 0,5 = \sqrt{10,2} - 0,5 = 2,7mm$$

$$l = 150mm > 6 * a = 6 * 4 = 24mm$$

$$> 30mm$$

$$< 150 * a = 150 * 4 = 600mm$$

Nachweis der Schweißnaht

$$A_w = n * a * l_w = 2 * 4mm * 150mm = 1200mm^2 \quad n=\text{Anzahl der Nähte}$$

$$\tau_{||} = \frac{V_z}{A_w} = \frac{190 * 10^3 N}{1200mm^2} = 158,33 \frac{N}{mm^2}$$

$$\sigma_{w,R,d} = \alpha_w * \frac{f_{y,k}}{\gamma_M} = 0,95 * \frac{240 \frac{N}{mm^2}}{1,1} = 207,27 \frac{N}{mm^2}$$

$$\frac{\tau_{||}}{\sigma_{w,R,d}} = \frac{158,33 \frac{N}{mm^2}}{207,27 \frac{N}{mm^2}} = \underline{0,76 < 1,0} \quad \text{Nachweis erfüllt}$$

maximal aufnehmbare Kraft der Schweißnaht

$$V_{z,\max} = \sigma_{w,Rd} * A_w = 207,27 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} * 1200 \text{mm}^2 = 248,72 \text{kN}$$

4.1.1.3 Nachweis der Schrauben, Verbindung Stirnplatte-Anschlussfläche

gegeben:

4 rohe Schrauben M20/4.6 (SL)

4.1.1.3.1 Ermittlung der Grenzabscherkraft:

$$V_{a,Rd} = A * m * \alpha_a * \frac{f_{u,b,k}}{\gamma_M}$$

$A = 314 \text{ mm}^2$ nach Anlage 2 für M20 (SL) Gewinde außerhalb der Scherfuge

$m = 1$

$\alpha_a = 0,6$ für Schrauben der Festigkeitsklasse 4.6

$f_{u,b,k} = 400 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$ nach Anlage 1

$\gamma_M = 1,1$

$$V_{a,Rd} = A * m * \alpha_a * \frac{f_{u,b,k}}{\gamma_M} = 314 \text{mm}^2 * 1 * 0,6 * \frac{0,4 \frac{\text{kN}}{\text{mm}^2}}{1,1} = \underline{68,51 \text{ kN}} \text{ /Schraube}$$

$$V_{a,Rd} = n * V_{a,Rd} = 4 * 68,51 \text{kN} = \underline{274,04}$$

4.1.1.3.2 Überprüfung der Schraubenabstände

$t_{\text{Stirnplatte}} = 10 \text{mm}$

$t_{\text{Gurt HEB 450}} = 26 \text{mm}$

$$e_1: 1,2 * d_l = 1,2 * 21 = 25,2 \text{mm} < e_1 = 40 \text{ mm} < 3 * d_l = 3 * 21 = 63 \text{mm} \\ < 6 * t = 6 * 10 = 60 \text{mm}$$

$$e_2: 1,2 * d_1 = 1,2 * 21 = 25,2\text{mm} < e_2 = 45 \text{ mm} < 3 * d_1 = 3 * 21 = 63\text{mm} \\ < 6 * t = 6 * 10 = 60\text{mm}$$

$$e_3: 2,4 * d_1 = 2,4 * 21 = 50,4\text{mm} < e_3 = 100\text{mm} < 6 * d_1 = 6 * 21 = 126\text{mm} \\ < 12 * t = 12 * 10 = 120\text{mm}$$

$$e \quad 2,2 * d_1 = 2,2 * 21 = 46,2\text{mm} < e = 70\text{mm} < 6 * d_1 = 6 * 21 = 126\text{mm} \\ < 12 * t = 12 * 10 = 120\text{mm}$$

4.1.1.3.3 Ermittlung der Grenzlochleibungskraft:

$$V_{l,R,d} = t * d_{Sch} * \sigma_{l,R,d}$$

$$\sigma_{l,R,d} = \alpha_l * \frac{f_{y,k}}{\gamma_M}$$

$$V_{l,R,d} = t * d_{Sch} * \alpha_l * \frac{f_{y,k}}{\gamma_M}$$

$$f_{y,k} = 240 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$d_{sch} = 20\text{mm}$$

$$\gamma_M = 1,1$$

$$\text{da } e_2 = 45 \text{ mm} \geq 1,5 * d_L = 1,5 * 21 = 31,5\text{mm}$$

$$\text{und } e_3 = 100\text{mm} \geq 3,0 * d_L = 3,0 * 21 = 63\text{mm} \text{ gilt:}$$

|| zur Kraftrichtung HEB

$$\text{Innen: } \alpha_l = 1,08 * \frac{e}{d_1} - 0,77 = 1,08 * \frac{70}{21} - 0,77 = 2,83$$

$$\text{Rand: } \alpha_l = 1,1 * \frac{e_{1,max}}{d_1} - 0,3 = 1,1 * \frac{60}{21} - 0,3 = 2,84$$

|| zur Krafrichtung Stirnplatte

$$\text{Innen: } \alpha_l = 1,08 * \frac{e}{d_l} - 0,77 = 1,08 * \frac{70}{21} - 0,77 = 2,83$$

$$\text{Rand: } \alpha_l = 1,1 * \frac{e_1}{d_l} - 0,3 = 1,1 * \frac{40}{21} - 0,3 = 1,79$$

aufnehmbare Kraft HEB

$$V_{l,Rd} = t * d_{sch} * \alpha_l * \frac{f_{y,k}}{\gamma_M}$$

$$t = \text{Gurt HEB 450} = 26\text{mm}$$

$$V_{l,Rd,HEB,Rand} = 26\text{mm} * 20\text{mm} * \frac{0,24 \frac{\text{kN}}{\text{mm}^2}}{1,1} * 2,84 = 322,21\text{kN}$$

$$V_{l,Rd,HEB,Innen} = 26\text{mm} * 20\text{mm} * \frac{0,24 \frac{\text{kN}}{\text{mm}^2}}{1,1} * 2,83 = 321,08\text{kN}$$

$$V_{l,Rd,HEB} = 2 * V_{l,Rd,Rand} + 2 * V_{l,Rd,Innen}$$

$$V_{l,Rd,HEB} = 2 * 322,21\text{kN} + 2 * 321,08\text{kN} = \underline{1286,58\text{kN}}$$

aufnehmbare Kraft Stirnplatte

$$V_{l,Rd} = t * d_{sch} * \alpha_l * \frac{f_{y,k}}{\gamma_M}$$

$$t = t_{\text{Stirnplatte}} = 10\text{mm}$$

$$V_{l,Rd,Stirnplatte,Rand} = 10\text{mm} * 20\text{mm} * \frac{0,24 \frac{\text{kN}}{\text{mm}^2}}{1,1} * 1,79 = 78,11\text{kN}$$

$$V_{l,Rd,Stirnplatte,Innen} = 10\text{mm} * 20\text{mm} * \frac{0,24 \frac{\text{kN}}{\text{mm}^2}}{1,1} * 2,83 = 123,49\text{kN}$$

$$V_{l,Rd,Stirnplatte} = 2 * V_{l,Rd,Rand} + 2 * V_{l,Rd,Innen}$$

$$V_{l,Rd,Stirnplatte} = 2 * 78,11\text{kN} + 2 * 123,49\text{kN} = \underline{403,2\text{kN}}$$

4.1.1.3.4 maximal aufnehmbare Kraft der Schraubverbindung

$$V_{l,Rd} = \min \begin{cases} V_{a,Rd} \\ V_{l,Rd,HEB} \\ V_{l,Rd,Stirnplatte} \end{cases}$$

$$V_{l,Rd} = 274,04 \text{ kN} = \min \begin{cases} 274,04 \text{ kN} \\ 1286,57 \text{ kN} \\ 487,87 \text{ kN} \end{cases}$$

4.1.1.3.5 Nachweis

$$\frac{V_z}{V_{l,Rd}} = \frac{190 \text{ kN}}{274,04 \text{ kN}} = \underline{0,69 < 1} \text{ Nachweis erfüllt!}$$

4.1.1.4 Nachweis der Risslinie

Ermittlung der Risslänge

$$l = e_3 + \left(2 * \frac{e_2}{\sin 60^\circ} \right) = 100 \text{ mm} + \left(2 * \frac{45 \text{ mm}}{\sin 60^\circ} \right) = 203,92 \text{ mm}$$

$$A_{\text{Brutto}} = l * t_{\text{stirnplatte}} = 203,92 \text{ mm} * 10 \text{ mm} = 2039,2 \text{ mm}^2$$

$$A_{\text{Netto}} = A_{\text{Brutto}} - (2 * d_l * t_{\text{Stirnplatte}}) = 2039,2 \text{ mm}^2 - (2 * 21 \text{ mm} * 10 \text{ mm}) \\ = 1619,2 \text{ mm}^2$$

$$\frac{A_{\text{Brutto}}}{A_{\text{Netto}}} = \frac{2039,2 \text{ mm}^2}{1619,2 \text{ mm}^2} = 1,25 > 1,2 \text{ Lochabzug berücksichtigen}$$

$$\sigma_{R,d} = \frac{f_{u,k}}{\gamma_f * \gamma_m} = \frac{360}{1,25 * 1,1} = 261,81$$

$$\sigma_d = \frac{V_z}{A_{\text{Netto}}} = \frac{190 * 10^3 \text{ N}}{1619,2 \text{ mm}^2} = 117,34 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$\frac{\sigma_d}{\sigma_{R,d}} = \frac{117,34 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}}{261,81 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}} = \underline{0,44 < 1,0} \text{ Nachweis erfüllt}$$

maximal aufnehmbare Kraft der Risslinie

$$V_{z,\max} = \sigma_{R,d} * A_{\text{Netto}} = 261,81 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} * 1619,2 \text{ mm}^2 = 439,63$$

4.1.2 Stirnplatte 1 nach Eurocode

4.1.2.1 Untersuchung des Trägersteges

IPE 500 DIN 1025 T5 S235

gegeben:

Profilabmessungen:

$$b = 200\text{mm}$$

$$t = 16\text{mm}$$

$$h_1 = 426\text{mm}$$

$$s = 10,2\text{mm}$$

$$V_z = 190\text{ kN}$$

$$f_y = 235 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$\begin{aligned} A_{\text{Steg/Stirnplatte}} &= h_{\text{Stirnplatte}} * s = 150\text{mm} * 10,2\text{mm} \\ &= 1530\text{mm}^2 \text{ (Schnitt neben Stirnplatte in Trägersteg)} \end{aligned}$$

Nachweisführung:

$$\tau = \frac{V_z}{A_{\text{Steg/Stirnplatte}}} = \frac{190 * 10^3\text{N}}{1530\text{mm}^2} = 124,18 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$\frac{\tau}{\frac{f_y}{\sqrt{3} * \gamma_{M0}}} \leq 1$$

$$\frac{124,18 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}}{\frac{235 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}}{\sqrt{3} * 1,0}} = \frac{124,18 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}}{135,7 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}} = 0,92 < 1 \text{ Nachweis erfüllt}$$

maximal aufnehmbare Kraft des Trägersteges

$$V_{z,\text{max}} = \frac{f_y}{\sqrt{3} * \gamma_{M,0}} * A_{\text{Steg/Stirnplatte}} = \frac{235 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}}{\sqrt{3} * 1,0} * 1530\text{mm}^2 = 207,6\text{kN}$$

4.1.2.2 Nachweis Schweißnaht, Verbindung Trägersteg-Stirnplatte

Überprüfung der Nahtgeometrie

$$3\text{mm} \leq a = 4\text{mm} < 0,7 * \min t = 0,7 * 10 = 7\text{mm}$$

$$> \sqrt{\max t} - 0,5 = \sqrt{10,2} - 0,5 = 2,7\text{mm}$$

$$l_w = 150\text{mm} > 6 * a_w = 6 * 4 = 24\text{mm}$$

$$> 30\text{mm}$$

$$< 150 * a = 150 * 4 = 600\text{mm} \rightarrow \text{keine Abminderung mit } \beta_{Lw}$$

Nachweis der Schweißnaht im richtungsbezogenen Verfahren

$$l_{w,\text{eff}} = l_w - (2 * a) = 150\text{mm} - (2 * 4\text{mm}) = 142\text{mm}$$

$$A_w = n * a_w * l_w = 2 * 4\text{mm} * 142 = 1136\text{mm}^2 \quad n=\text{Anzahl der Nähte}$$

$$\tau_{\parallel} = \frac{V_z}{\sum a * l_w} = \frac{190 * 10^3\text{N}}{1136\text{mm}^2} = 167,25 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$\sigma_{wv,\text{Ed}} = \sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3 * (\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2)} = \sqrt{3 * 167,25^2} = 289,69 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$\beta_w = 0,8 \text{ für S235 Walzprofil}$$

$$\gamma_{M2} = 1,25$$

f_u ist nach Anlage 3 zu ermitteln

$$\sigma_{wv,\text{R,d}} = \frac{f_u}{\beta_w * \gamma_{M2}} = \frac{360 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}}{0,8 * 1,25} = 360 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$\frac{\sigma_{wv,\text{Ed}}}{\sigma_{wv,\text{R,d}}} = \frac{289,69 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}}{360 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}} = \underline{0,80 < 1} \text{ Nachweis erfüllt}$$

maximal aufnehmbare Kraft der Schweißnaht

$$\tau_{w,Rd} = \sqrt{\frac{f_u^2}{3}} = \sqrt{\frac{360^2}{3}} = 207,84 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$V_{z,\max} = \tau_{wv,Rd} * A_w = 207,84 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} * 1136 \text{mm}^2 = 236,10 \text{kN}$$

4.1.2.3 Nachweis der Schrauben, Verbindung Stirnplatte-Anschlussfläche

gegeben:

4 rohe Schrauben M20/4.6 (Kategorie A)

4.1.2.3.1 Ermittlung der Grenzabscherkraft:

$$F_{v,Rd} = \frac{\alpha_v * f_{ub} * A}{\gamma_{M2}}$$

$A = 314 \text{ mm}^2$ nach Anlage 2 für M20 (Kategorie 1) Gewinde außerhalb der Scherfuge

$\alpha_v = 0,6$ für abgescherten Schaft und allen Festigkeitsklassen

$$f_{ub} = 400 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \text{ nach Anlage 1}$$

$$\gamma_{M2} = 1,25$$

$$F_{v,Rd} = \frac{\alpha_v * f_{ub} * A}{\gamma_{M2}} = \frac{0,6 * 0,4 \frac{\text{kN}}{\text{mm}^2} * 314 \text{mm}^2}{1,25} = \underline{60,29 \text{kN}} / \text{Schraube}$$

$$F_{v,Rd} = n * F_{v,Rd} = 4 * 60,29 \text{kN} = 241,16 \text{kN}$$

4.1.2.3.2 Überprüfung der Schraubenabstände

t = Dicke des dünnsten außenliegenden Bleches = $t_{\text{Stirnplatte}} = 10 \text{mm}$

$$e_1: 1,2 * d_0 = 1,2 * 21 = 25,2 \text{mm} < e_1 = 40 \text{mm} < 4t + 40 \text{mm} = 4 * 10 + 40 \\ = 80 \text{mm}$$

$$e_2: 1,2 * d_0 = 1,2 * 21 = 25,2\text{mm} < e_2 = 45 \text{ mm} < 4t + 40\text{mm} = 4 * 10 + 40 = 80\text{mm}$$

$$p_2: 2,4 * d_0 = 2,4 * 21 = 50,4\text{mm} < p_2 = 100\text{mm} < \min \begin{cases} 14 * t = 140\text{mm} \\ 200\text{mm} \end{cases}$$

$$p_1: 2,2 * d_0 = 2,2 * 21 = 46,2\text{mm} < p_1 = 70\text{mm} < \min \begin{cases} 14 * t = 140\text{mm} \\ 200\text{mm} \end{cases}$$

4.1.2.3.3 Ermittlung der Grenzlochleibungskraft:

$$F_{b,Rd} = k_1 * \alpha_b * d * t * \frac{f_u}{\gamma_{M2}}$$

$$f_u = 360 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$d = 20\text{mm}$$

$$d_0 = 21\text{mm}$$

$$\gamma_{M2} = 1,25$$

$$f_{u,b} = 400 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

⊥ zur Kraftrichtung

$$\text{Innen: } k_1 = 2,5 = \min \begin{cases} 1,4 * \frac{p_2}{d_0} - 1,7 \\ 2,5 \end{cases} = \min \begin{cases} 1,4 * \frac{100}{21} - 1,7 = 4,96 \\ 2,5 \end{cases}$$

$$\text{Rand: } k_1 = 2,5 = \min \begin{cases} 2,8 * \frac{e_2}{d_0} - 1,7 \\ 1,4 * \frac{p_2}{d_0} - 1,7 \\ 2,5 \end{cases} = \min \begin{cases} 2,8 * \frac{45}{21} - 1,7 = 4,3 \\ 1,4 * \frac{100}{21} - 1,7 = 4,96 \\ 2,5 \end{cases}$$

|| zur Kraftrichtung, Randschraube

$$\text{HEB: } \alpha_d = \frac{e_{1,\max}}{3 * d_o} = \frac{80}{3 * 21} = 1,26$$

$$\text{Stirnplatte: } \alpha_d = \frac{e_1}{3 * d_o} = \frac{40}{3 * 21} = 0,634$$

|| zur Kraftrichtung, Innenschraube

$$\text{HEB: } \alpha_d = \frac{p_1}{3 * d_o} - 0,25 = \frac{70}{3 * 21} - 0,25 = 0,86$$

$$\text{Stirnplatte: } \alpha_d = \frac{p_1}{3 * d_o} - 0,25 = \frac{70}{3 * 21} - 0,25 = 0,86$$

Aufnehmbare Kraft HEB

t = Gurt von HEB = 26mm

Randbereich

$$k_1 = 2,5$$

$$a_b = 1,0 = \min \left\{ \frac{a_d}{f_{ub}} = \min \left\{ \frac{1,26}{400} = 1,11 \right. \right.$$
$$\left. \frac{f_u}{1,0} \right\}$$

$$F_{b,Rd} = k_1 * \alpha_b * d * t * \frac{f_u}{\gamma_{M2}}$$

$$F_{b,Rd} = 2,5 * 1,0 * 20\text{mm} * 26\text{mm} * \frac{0,36 \frac{\text{kN}}{\text{mm}^2}}{1,25} = 374,4\text{kN}$$

Innenbereich

$$k_1 = 2,5$$

$$a_b = 1,0 = \min \left\{ \frac{a_d}{f_{ub}} = \min \left\{ \frac{0,86}{400} = 1,11 \right. \right.$$
$$\left. \frac{f_u}{1,0} \right\}$$

$$F_{b,Rd} = k_1 * \alpha_b * d * t * \frac{f_u}{\gamma_{M2}}$$

$$F_{b,Rd} = 2,5 * 0,86 * 20\text{mm} * 26\text{mm} * \frac{0,36 \frac{\text{kN}}{\text{mm}^2}}{1,25} = 321,98\text{kN}$$

Kombiniert für HEB

$$F_{b,Rd} = 2 * (F_{b,Rd,Rand} + F_{b,Rd,Innen}) = 2 * (374,4\text{kN} + 321,98\text{kN}) = \underline{1392,76\text{kN}}$$

Aufnehmbare Kraft Stirnplatte

$$t = t_{\text{Stirnplatte}} = 10\text{mm}$$

Randbereich

$$k_1 = 2,5$$

$$\alpha_b = 1,0 = \min \left\{ \frac{a_d}{f_{ub}} = \min \left\{ \frac{0,634}{400} = 1,11 \right. \right.$$

$$\left. \frac{f_u}{1,0} \right\}$$

$$F_{b,Rd} = k_1 * \alpha_b * d * t * \frac{f_u}{\gamma_{M2}}$$

$$F_{b,Rd} = 2,5 * 0,634 * 20\text{mm} * 10\text{mm} * \frac{0,36 \frac{\text{kN}}{\text{mm}^2}}{1,25} = 91,29\text{kN}$$

Innenbereich

$$k_1 = 2,5$$

$$\alpha_b = 1,0 = \min \left\{ \frac{a_d}{f_{ub}} = \min \left\{ \frac{0,86}{400} = 1,11 \right. \right.$$

$$\left. \frac{f_u}{1,0} \right\}$$

$$F_{b,Rd} = k_1 * \alpha_b * d * t * \frac{f_u}{\gamma_{M2}}$$

$$F_{b,Rd} = 2,5 * 0,86 * 20\text{mm} * 10\text{mm} * \frac{0,36 \frac{\text{kN}}{\text{mm}^2}}{1,25} = 123,84\text{kN}$$

Kombiniert für Stirnplatte

$$F_{b,Rd} = 2 * (F_{b,Rd,Rand} + F_{b,Rd,Innen}) = 2 * (91,2\text{kN} + 123,84\text{kN}) = \underline{430,08\text{kN}}$$

4.1.2.3.4 maximal aufnehmbare Kraft der Schraubverbindung

$$F_{b,Rd} = \min \begin{cases} F_{v,Ed} \\ F_{b,Rd,HEB} \\ F_{b,Rd,Stirnplatte} \end{cases}$$

$$F_{b,Rd} = 241,1 \text{ kN} = \min \begin{cases} 241,16 \text{ kN} \\ 1392,72 \text{ kN} \\ 430,08 \text{ kN} \end{cases}$$

4.1.2.3.5 Nachweis

$$\frac{V_z}{F_{b,Rd}} = \frac{190 \text{ kN}}{241,16 \text{ kN}} = \underline{0,78} < 1 \text{ Nachweis erfüllt!}$$

4.1.2.4 Nachweis der Blockversagen

Zentrische Belastung:

$$V_{\text{eff},1,Rd} = A_{nt} * \frac{f_u}{\gamma_{M2}} + A_{nv} * \frac{f_y}{\sqrt{3} * \gamma_{M0}}$$

$$\gamma_{M2} = 1,25$$

$$\gamma_{M0} = 1,0$$

f_u und f_y sind nach Anlage 2 zu ermitteln

$$A_{nt} = (p_2 - d_0) * t = (100 \text{ mm} - 21 \text{ mm}) * 10 \text{ mm} = 790 \text{ mm}^2$$

$$\begin{aligned} A_{nv} &= 2 * ((p_1 + e_1) - 1,5 * d_0) * t \\ &= 2 * ((40 \text{ mm} + 70 \text{ mm}) - 1,5 * 21 \text{ mm}) * 10 \text{ mm} = 1570 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} V_{\text{eff},1,Rd} &= A_{nt} * \frac{f_u}{\gamma_{M2}} + A_{nv} * \frac{f_y}{\sqrt{3} * \gamma_{M0}} \\ &= 790 \text{ mm}^2 * \frac{0,36 \frac{\text{kN}}{\text{mm}^2}}{1,25} + 1570 \text{ mm}^2 * \frac{0,235 \frac{\text{kN}}{\text{mm}^2}}{\sqrt{3} * 1,0} = 440,6 \text{ kN} \end{aligned}$$

$$\frac{V_z}{V_{\text{eff},1,Rd}} = \frac{190 \text{ kN}}{440,6 \text{ kN}} = \underline{0,43} < 1 \text{ Nachweis erfüllt}$$

4.1.3 Ergebnisvergleich

Tabelle 38 Ergebnisvergleich Stirnplatte 1

Vergleich	Aufnehmbare Kraft in kN nach DIN 18800	Aufnehmbare Kraft in kN nach Eurocode	Prozentuale Auswertung*
Steg	192,78	207,6	107,7%
Schweißnaht	248,72	236,1	94,9%
Abscheren	274,04	241,16	88,0%
Lochleibung HEB	1286,58	1392,76	108,3%
Lochleibung Stirnplatte	403,2	430,08	106,7%
Risslinie / Blockversagen	439,63	440,6	100,24%

*: der maximal aufnehmbaren Kraft nach Eurocode, wenn die DIN mit 100% angenommen wird

4.2 Stirnplattenvariante 2

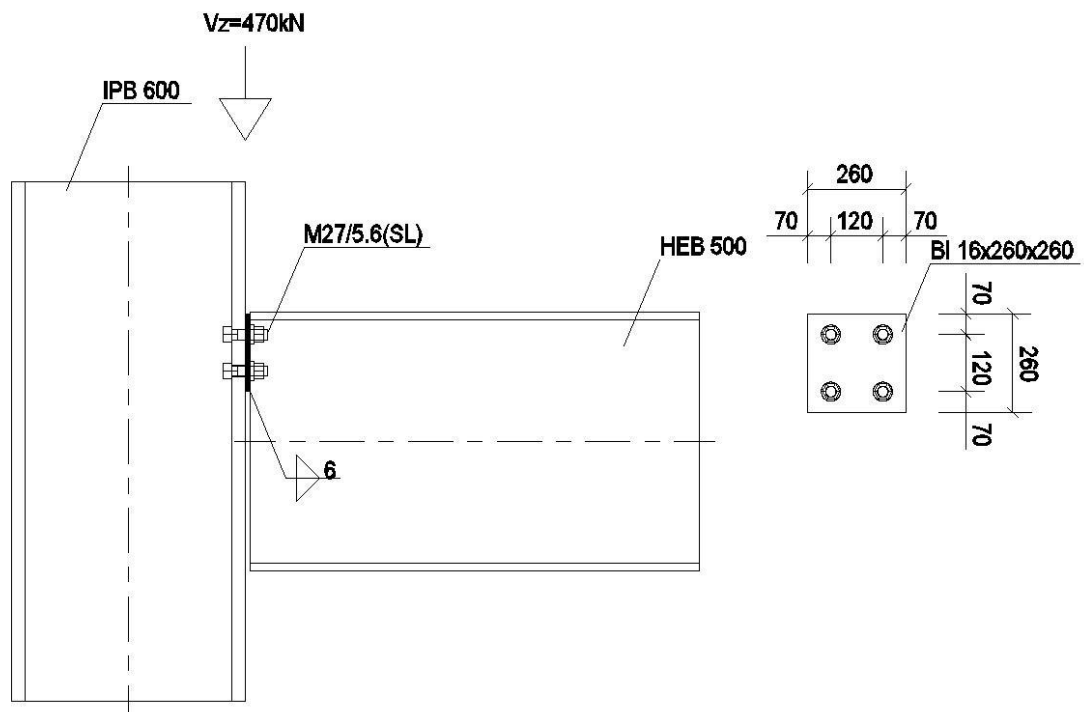


Abbildung 18 Stirnplattenanschluss Variante 2

4.2.1 Stirnplatte 2 nach DIN

4.2.1.1 Untersuchung des Trägersteges

HEB 500 DIN 1025 T5 S235

gegeben:

Profilabmessungen:

$$b = 300\text{mm}$$

$$t = 28\text{mm}$$

$$h_1 = 390\text{mm}$$

$$s = 14,5\text{mm}$$

$$V_z = 470\text{kN}$$

$$f_{y,k} = 240 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$A_{\text{Gurt}} = b * t = 300\text{mm} * 28\text{mm} = 8400\text{mm}^2$$

$$A_{\text{Steg}} = h_1 * s = 390\text{mm} * 14,5\text{mm} = 5655\text{mm}^2$$

$$A_{\text{Steg/Stirnplatte}} = h_{\text{Stirnplatte}} * s = 260\text{mm} * 14,5\text{mm} = 3770\text{mm}^2 \quad (\text{Schnitt neben Stirnplatte in Trägersteg})$$

Nachweisführung:

$$\text{wenn } \frac{A_{\text{Gurt}}}{A_{\text{Steg}}} > 0,6 \text{ dann gilt, } \tau = \frac{V_z}{A_{\text{Steg/Stirnplatte}}}$$

$$\frac{A_{\text{Gurt}}}{A_{\text{Steg}}} = \frac{8400\text{mm}^2}{5655\text{mm}^2} = 1,48 > 0,6$$

$$\tau = \frac{V_z}{A_{\text{Steg/Stirnplatte}}} = \frac{470 * 10^3\text{N}}{3770\text{mm}^2} = 124,67 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$\tau_{R,d} = \frac{f_{y,k}}{\sqrt{3} * \gamma_M} = \frac{240 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}}{\sqrt{3} * 1,1} = 126 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$\frac{\tau}{\tau_{R,d}} = \frac{124,67 \frac{N}{mm^2}}{126 \frac{N}{mm^2}} = \underline{0,99 < 1,0} \quad \text{Nachweis erfüllt}$$

maximal aufnehmbare Kraft des Trägersteges

$$V_{z,max} = \tau_{R,d} * A_{\text{Steg-Stirnplatte}} = 126 \frac{N}{mm^2} * 3770 mm^2 = 475 kN$$

4.2.1.2 Nachweis der Schweißnaht, Verbindung Träger-Stirnplatte

Überprüfung der Nahtgeometrie nach DIN 18800 T1

$$\min t = \text{Steg}_{\text{HEB 500}} = 14,5 mm$$

$$\max t = t_{\text{Stirnplatte}} = 16 mm$$

$$2 mm \leq a = 6 mm < 0,7 * \min t = 0,7 * 14,5 = 10,15 mm$$

$$> \sqrt{\max t} - 0,5 = \sqrt{16} - 0,5 = 3,5 mm$$

$$l = 260 mm > 6 * a = 6 * 6 = 36 mm$$

$$> 30 mm$$

$$< 150 * a = 150 * 6 = 900 mm$$

Nachweis der Schweißnaht

$$A_w = n * a * l_w = 2 * 6 mm * 260 mm = 3120 mm^2 \quad n = \text{Anzahl der Nähte}$$

$$\tau_{\parallel} = \frac{V_z}{A_w} = \frac{470 * 10^3 N}{3120 mm^2} = 150,64 \frac{N}{mm^2}$$

$$\sigma_{w,R,d} = \alpha_w * \frac{f_{y,k}}{\gamma_M} = 0,95 * \frac{240 \frac{N}{mm^2}}{1,1} = 207,27 \frac{N}{mm^2}$$

$$\frac{\tau_{\parallel}}{\sigma_{w,Rd}} = \frac{150,64 \frac{N}{mm^2}}{207,27 \frac{N}{mm^2}} = \underline{0,73 < 1,0} \quad \text{Nachweis erfüllt}$$

maximal aufnehmbare Kraft der Schweißnaht

$$V_{z,max} = \sigma_{w,Rd} * A_w = 207,27 \frac{N}{mm^2} * 3120 mm^2 = 646,7 kN$$

4.2.1.3 Nachweis der Schrauben, Verbindung Trägersteg-Anschlussfläche gegeben:

4 rohe Schrauben M2027/5.6 (SL)

4.2.1.3.1 Ermittlung der Grenzabscherkraft

$$V_{a,Rd} = A * m * \alpha_a * \frac{f_{u,b,k}}{\gamma_M}$$

$A = 573 \text{ mm}^2$ nach Anlage 2 für M27 (SL) Gewinde außerhalb der Scherfuge

$m = 1$

$\alpha_a = 0,6$ für Schrauben der Festigkeitsklasse 4.6

$f_{u,b,k} = 500 \frac{N}{mm^2}$ nach Anlage 1

$\gamma_M = 1,1$

$$V_{a,Rd} = A * m * \alpha_a * \frac{f_{u,b,k}}{\gamma_M} = 573 mm^2 * 1 * 0,6 * \frac{0,5 \frac{kN}{mm^2}}{1,1} = \underline{156,27 \text{ kN}} \text{ /Schraube}$$

$$V_{a,Rd} = n * V_{a,Rd} = 4 * 156,27 kN = \underline{625 \text{ kN}}$$

4.2.1.3.2 Überprüfung der Schraubenabstände

$t_{\text{Stirnplatte}} = 16 \text{ mm}$

$t_{\text{Gurt IPB 600}} = 30 \text{ mm}$

$d_1 = 30 \text{ mm}$

$$e_1: 1,2 * d_l = 1,2 * 30 = 36\text{mm} \quad < e_1 = 70 \text{ mm} \quad < 3 * d_l = 3 * 30 = 90\text{mm} \\ < 6 * t = 6 * 16 = 96\text{mm}$$

$$e_2: 1,2 * d_l = 1,2 * 30 = 36\text{mm} \quad < e_2 = 70 \text{ mm} \quad < 3 * d_l = 3 * 30 = 90\text{mm} \\ < 6 * t = 6 * 16 = 96\text{mm}$$

$$e_3: 2,4 * d_l = 2,4 * 30 = 72\text{mm} \quad < e_3 = 120\text{mm} \quad < 6 * d_l = 6 * 30 = 180\text{mm} \\ < 12 * t = 12 * 16 = 192\text{mm}$$

$$e \quad 2,2 * d_l = 2,2 * 30 = 66\text{mm} \quad < e = 120\text{mm} \quad < 6 * d_l = 6 * 30 = 180\text{mm} \\ < 12 * t = 12 * 16 = 192\text{mm}$$

4.2.1.3.3 Ermittlung der Grenzlochleibungskraft

$$V_{l,R,d} = t * d_{Sch} * \sigma_{l,R,d}$$

$$\sigma_{l,R,d} = \alpha_l * \frac{f_{y,k}}{\gamma_M}$$

$$V_{l,R,d} = t * d_{Sch} * \alpha_l * \frac{f_{y,k}}{\gamma_M}$$

$$f_{y,k} = 240 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$d_{sch} = 27\text{mm}$$

$$\gamma_M = 1,1$$

$$\text{da } e_2 = 70 \text{ mm} \geq 1,5 * d_L = 1,5 * 30 = 45\text{mm}$$

$$\text{und } e_3 = 120\text{mm} \geq 3,0 * d_L = 3,0 * 30 = 90\text{mm} \text{ gilt:}$$

|| zur Krafrichtung IPB

$$\text{Innen: } \alpha_1 = 1,08 * \frac{e}{d_1} - 0,77 = 1,08 * \frac{120}{30} - 0,77 = 3,55 > 3,0 \Rightarrow \alpha_1 = 3,0$$

$$\text{Rand: } \alpha_1 = 1,1 * \frac{e_{1,\max}}{d_1} - 0,3 = 1,1 * \frac{90}{30} - 0,3 = 3,0$$

|| zur Krafrichtung Stirnplatte

$$\text{Innen: } \alpha_1 = 1,08 * \frac{e}{d_1} - 0,77 = 1,08 * \frac{120}{30} - 0,77 = 3,55 > 3,0 \Rightarrow \alpha_1 = 3,0$$

$$\text{Rand: } \alpha_1 = 1,1 * \frac{e_1}{d_1} - 0,3 = 1,1 * \frac{70}{30} - 0,3 = 2,26$$

aufnehmbare Kraft IPB

$$V_{l,Rd} = t * d_{sch} * \alpha_1 * \frac{f_{y,k}}{\gamma_M}$$

$$t = \text{Gurt IPB 600} = 30\text{mm}$$

$$V_{l,Rd,IPB,Rand} = 30\text{mm} * 27\text{mm} * \frac{0,24 \frac{\text{kN}}{\text{mm}^2}}{1,1} * 3,0 = 530,2\text{kN}$$

$$V_{l,Rd,IPB,Innen} = 30\text{mm} * 27\text{mm} * \frac{0,24 \frac{\text{kN}}{\text{mm}^2}}{1,1} * 3,0 = 530,2\text{kN}$$

$$V_{l,Rd,HEB} = 2 * V_{l,Rd,Rand} + 2 * V_{l,Rd,Innen}$$

$$V_{l,Rd,HEB} = 2 * 530,2\text{kN} + 2 * 530,2\text{kN} = \underline{2120,8\text{kN}}$$

aufnehmbare Kraft Stirnplatte

$$V_{l,Rd} = t * d_{sch} * \alpha_1 * \frac{f_{y,k}}{\gamma_M}$$

$$t = t_{\text{Stirnplatte}} = 16\text{mm}$$

$$V_{l,Rd,Stirnplatte,Rand} = 16\text{mm} * 27\text{mm} * \frac{0,24 \frac{\text{kN}}{\text{mm}^2}}{1,1} * 2,26 = 213,0\text{kN}$$

$$V_{l,Rd,Stirnplatte,Innen} = 16\text{mm} * 27\text{mm} * \frac{0,24 \frac{\text{kN}}{\text{mm}^2}}{1,1} * 3,0 = 282,8\text{kN}$$

$$V_{l,Rd,Stirnplatte} = 2 * V_{l,Rd,Rand} + 2 * V_{l,Rd,Innen}$$

$$V_{l,Rd,Stirnplatte} = 2 * 213,0\text{kN} + 2 * 282,8\text{kN} = \underline{991,6\text{kN}}$$

4.2.1.3.4 maximal aufnehmbare Kraft der Schraubenverbindung

$$V_{l,Rd} = \min \begin{cases} V_{a,Rd} \\ V_{l,Rd,IPB} \\ V_{l,Rd,Stirnplatte} \end{cases}$$

$$V_{l,Rd} = 625\text{kN} = \min \begin{cases} 625\text{kN} \\ 2120,8\text{kN} \\ 991,6\text{kN} \end{cases}$$

4.2.1.3.5 Nachweis

$$\frac{V_z}{V_{l,Rd}} = \frac{470\text{kN}}{625\text{kN}} = \underline{0,75 < 1} \text{ Nachweis erfüllt!}$$

4.2.1.4 Nachweis der Risslinie

Ermittlung der Risslänge

$$l = e_3 + \left(2 * \frac{e_2}{\sin 60^\circ} \right) = 120\text{mm} + \left(2 * \frac{70\text{mm}}{\sin 60^\circ} \right) = 281,7\text{mm}$$

$$A_{\text{Brutto}} = l * t_{\text{stirnplatte}} = 281,7\text{mm} * 16\text{mm} = 4507,2\text{mm}^2$$

$$\begin{aligned} A_{\text{Netto}} &= A_{\text{Brutto}} - (2 * d_l * t_{\text{Stirnplatte}}) = 4507,2\text{mm}^2 - (2 * 30\text{mm} * 16\text{mm}) \\ &= 3547,2\text{mm}^2 \end{aligned}$$

$$\frac{A_{\text{Brutto}}}{A_{\text{Netto}}} = \frac{4507,2\text{mm}^2}{3547,2\text{mm}^2} = 1,27 > 1,2 \text{ Lochabzug berücksichtigen}$$

$$\sigma_{R,d} = \frac{f_{u,k}}{\gamma_f * \gamma_m} = \frac{360}{1,25 * 1,1} = 261,81$$

$$\sigma_d = \frac{V_z}{A_{\text{Netto}}} = \frac{470 * 10^3 \text{N}}{3547,2 \text{mm}^2} = 132,5 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$\frac{\sigma_d}{\sigma_{R,d}} = \frac{132,5 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}}{261,81 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}} = \underline{0,51 < 1,0} \quad \text{Nachweis erfüllt}$$

maximal aufnehmbare Kraft der Risslinie

$$V_{z,\text{max}} = \sigma_{R,d} * A_{\text{Netto}} = 261,81 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} * 3547,2 \text{mm}^2 = 928,69 \text{kN}$$

4.2.2 Stirnplatte 2 nach Eurocode

4.2.2.1 Untersuchung des Trägersteges

HEB 500 DIN 1025 T5 S235

gegeben:

Profilabmessungen:

$$b = 300\text{mm}$$

$$t = 28\text{mm}$$

$$h_1 = 390\text{mm}$$

$$s = 14,5\text{mm}$$

$$V_z = 470 \text{ kN}$$

$$f_y = 235 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$\begin{aligned} A_{\text{Steg/Stirnplatte}} &= h_{\text{Stirnplatte}} * s = 260\text{mm} * 14,5\text{mm} \\ &= 3770\text{mm}^2 \text{ (Schnitt neben Stirnplatte in Trägersteg)} \end{aligned}$$

Nachweisführung:

$$\tau = \frac{V_z}{A_{\text{Steg/Stirnplatte}}} = \frac{470 * 10^3 \text{N}}{3770\text{mm}^2} = 124,67 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$\frac{\tau}{\frac{f_y}{\sqrt{3} * \gamma_{M0}}} \leq 1$$

$$\frac{124,67 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}}{\frac{235 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}}{\sqrt{3} * 1,0}} = \frac{124,67 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}}{135,7 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}} = 0,92 < 1 \text{ Nachweis erfüllt}$$

maximal aufnehmbare Kraft des Trägersteges

$$V_{z,\text{max}} = \frac{f_y}{\sqrt{3} * \gamma_{M,0}} * A_{\text{Steg/Stirnplatte}} = \frac{235 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}}{\sqrt{3} * 1,0} * 3770\text{mm}^2 = 511,59 \text{ kN}$$

4.2.2.2 Nachweis der Schweißnaht ,Verbindung Trägersteg-Stirnplatte

Überprüfung der Nahtgeometrie

$$\min t = \text{Steg}_{\text{HEB } 500} = 14,5\text{mm}$$

$$\max t = t_{\text{Stirnplatte}} = 16\text{mm}$$

$$3\text{mm} \leq a = 6\text{mm} < 0,7 * \min t = 0,7 * 14,5 = 10,15\text{mm}$$

$$> \sqrt{\max t} - 0,5 = \sqrt{16} - 0,5 = 3,5\text{mm}$$

$$l_w = 260\text{mm} > 6 * a_w = 6 * 6 = 36\text{mm}$$

$$> 30\text{mm}$$

$$< 150 * a = 150 * 6 = 900\text{mm} \rightarrow \text{keine Abminderung mit } \beta_{Lw}$$

Nachweis der Schweißnaht im richtungsbezogenen Verfahren

$$l_{w,\text{eff}} = l_w - (2 * a) = 260\text{mm} - (2 * 6\text{mm}) = 248\text{mm}$$

$$A_w = n * a_w * l_w = 2 * 6\text{mm} * 248 = 2976\text{mm}^2 \quad n=\text{Anzahl der Nähte}$$

$$\tau_{\parallel} = \frac{V_z}{\sum a * l_w} = \frac{470 * 10^3\text{N}}{2976\text{mm}^2} = 157,9 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$\sigma_{wv,\text{Ed}} = \sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3 * (\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2)} = \sqrt{3 * 157,9^2} = 273,5 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$\beta_w = 0,8 \text{ für S235 Walzprofil}$$

$$\gamma_{M2} = 1,25$$

f_u ist nach Anlage 3 zu ermitteln

$$\sigma_{wv,\text{Rd}} = \frac{f_u}{\beta_w * \gamma_{M2}} = \frac{360 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}}{0,8 * 1,25} = 360 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$\frac{\sigma_{wv,\text{Ed}}}{\sigma_{wv,\text{Rd}}} = \frac{273,5 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}}{360 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}} = 0,76 < 1 \text{ Nachweis erfüllt}$$

maximal aufnehmbare Kraft der Schweißnaht

$$\tau_{w,Rd} = \sqrt{\frac{f_u^2}{3}} = \sqrt{\frac{360^2}{3}} = 207,84 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$V_{z,\max} = \tau_{wv,Rd} * A_w = 207,84 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} * 2976 \text{mm}^2 = 618,53 \text{kN}$$

4.2.2.3 Nachweis der Schrauben, Verbindung Stirnplatte-Anschlussfläche

gegeben:

4 rohe Schrauben M27/5.6 (Kategorie A)

4.2.2.3.1 Ermittlung der Grenzabscherkraft

$$F_{v,Rd} = \frac{\alpha_v * f_{ub} * A}{\gamma_{M2}}$$

$A = 573 \text{mm}^2$ nach Anlage 2 für M27 (Kategorie 1) Gewinde außerhalb der Scherfuge

$\alpha_v = 0,6$ für abgescherten Schaft und allen Festigkeitsklassen

$$f_{ub} = 500 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \text{ nach Anlage 1}$$

$$\gamma_{M2} = 1,25$$

$$F_{v,Rd} = \frac{\alpha_v * f_{ub} * A}{\gamma_{M2}} = \frac{0,6 * 0,5 \frac{\text{kN}}{\text{mm}^2} * 573 \text{mm}^2}{1,25} = \underline{137,52 \text{kN} / \text{Schraube}}$$

$$F_{v,Rd} = n * F_{v,Rd} = 4 * 137,52 \text{kN} = 550 \text{kN}$$

4.2.2.3.2 Überprüfung der Schraubenabstände

$t = \text{Dicke des dünnsten außenliegenden Bleches} = t_{\text{Stirnplatte}} = 16 \text{mm}$

$$e_1: 1,2 * d_0 = 1,2 * 30 = 36 \text{mm} < e_1 = 70 \text{mm} < 4t + 40 \text{mm} = 4 * 16 + 40 \\ = 104 \text{mm}$$

$$e_2: 1,2 * d_0 = 1,2 * 30 = 36\text{mm} < e_2 = 70\text{mm} < 4t + 40\text{mm} = 4 * 16 + 40 = 104\text{mm}$$

$$p_2: 2,4 * d_0 = 2,4 * 30 = 72\text{mm} < p_2 = 120\text{mm} < \min \begin{cases} 14 * t = 224\text{mm} \\ 200\text{mm} \end{cases}$$

$$p_1: 2,2 * d_0 = 2,2 * 30 = 66\text{mm} < p_1 = 120\text{mm} < \min \begin{cases} 14 * t = 224\text{mm} \\ 200\text{mm} \end{cases}$$

4.2.2.3.3 Ermittlung der Grenzlochleibungskraft

$$F_{b,Rd} = k_1 * \alpha_b * d * t * \frac{f_u}{\gamma_{M2}}$$

$$f_u = 360 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$d = 27\text{mm}$$

$$d_0 = 30\text{mm}$$

$$\gamma_{M2} = 1,25$$

$$f_{u,b} = 500 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

⊥ zur Kraftrichtung

$$\text{Innen: } k_1 = 2,5 = \min \begin{cases} 1,4 * \frac{p_2}{d_0} - 1,7 \\ 2,5 \end{cases} = \min \begin{cases} 1,4 * \frac{120}{30} - 1,7 = 3,9 \\ 2,5 \end{cases}$$

$$\text{Rand: } k_1 = 2,5 = \min \begin{cases} 2,8 * \frac{e_2}{d_0} - 1,7 \\ 1,4 * \frac{p_2}{d_0} - 1,7 \\ 2,5 \end{cases} = \min \begin{cases} 2,8 * \frac{70}{30} - 1,7 = 4,83 \\ 1,4 * \frac{120}{30} - 1,7 = 3,9 \\ 2,5 \end{cases}$$

|| zur Kraftrichtung, Randschraube

$$\text{IPB: } \alpha_d = \frac{e_{1,\max}}{3 * d_o} = \frac{104}{3 * 30} = 1,15$$

$$\text{Stirnplatte: } \alpha_d = \frac{e_1}{3 * d_o} = \frac{70}{3 * 30} = 0,77$$

|| zur Kraftrichtung, Innenschraube

$$\text{IPB: } \alpha_d = \frac{p_1}{3 * d_o} - 0,25 = \frac{120}{3 * 30} - 0,25 = 1,08$$

$$\text{Stirnplatte: } \alpha_d = \frac{p_1}{3 * d_o} - 0,25 = \frac{120}{3 * 30} - 0,25 = 1,08$$

Aufnehmbare Kraft IPB

t = Gurt von IPB = 30mm

Randbereich

$$k_1 = 2,5$$

$$a_b = 1,0 = \min \left\{ \frac{a_d}{f_{ub}} = \min \left\{ \frac{1,15}{500} = 1,39 \right. \right.$$
$$\left. \left. \frac{f_u}{1,0} \right\} \right.$$

$$F_{b,Rd} = k_1 * \alpha_b * d * t * \frac{f_u}{\gamma_{M2}}$$

$$F_{b,Rd} = 2,5 * 1,0 * 27\text{mm} * 30\text{mm} * \frac{0,36 \frac{\text{kN}}{\text{mm}^2}}{1,25} = 583,2\text{kN}$$

Innenbereich

$$k_1 = 2,5$$

$$a_b = 1,0 = \min \left\{ \frac{a_d}{f_{ub}} = \min \left\{ \frac{1,08}{500} = 1,39 \right. \right.$$
$$\left. \left. \frac{f_u}{1,0} \right\} \right.$$

$$F_{b,Rd} = k_1 * \alpha_b * d * t * \frac{f_u}{\gamma_{M2}}$$

$$F_{b,Rd} = 2,5 * 1,0 * 27\text{mm} * 30\text{mm} * \frac{0,36 \frac{\text{kN}}{\text{mm}^2}}{1,25} = 583,2\text{kN}$$

Kombiniert für IPB

$$F_{b,Rd} = 2 * (F_{b,Rd,Rand} + F_{b,Rd,Innen}) = 2 * (583,2\text{kN} + 583,2\text{kN}) = \underline{2332,8\text{kN}}$$

Aufnehmbare Kraft Stirnplatte

$$t = t_{\text{Stirnplatte}} = 16\text{mm}$$

Randbereich

$$k_1 = 2,5$$

$$a_b = 0,77 = \min \left\{ \frac{a_d}{f_{ub}} = \min \left\{ \frac{0,77}{500} = 1,39 \right. \right.$$

$$\left. \frac{f_u}{1,0} \right\}$$

$$F_{b,Rd} = k_1 * \alpha_b * d * t * \frac{f_u}{\gamma_{M2}}$$

$$F_{b,Rd} = 2,5 * 0,77 * 27\text{mm} * 16\text{mm} * \frac{0,36 \frac{\text{kN}}{\text{mm}^2}}{1,25} = 239,5\text{kN}$$

Innenbereich

$$k_1 = 2,5$$

$$a_b = 1,0 = \min \left\{ \frac{a_d}{f_{ub}} = \min \left\{ \frac{1,08}{500} = 1,39 \right. \right.$$

$$\left. \frac{f_u}{1,0} \right\}$$

$$F_{b,Rd} = k_1 * \alpha_b * d * t * \frac{f_u}{\gamma_{M2}}$$

$$F_{b,Rd} = 2,5 * 1,0 * 27\text{mm} * 16\text{mm} * \frac{0,36 \frac{\text{kN}}{\text{mm}^2}}{1,25} = 311,0\text{kN}$$

Kombiniert für Stirnplatte

$$F_{b,Rd} = 2 * (F_{b,Rd,Rand} + F_{b,Rd,Innen}) = 2 * (239,5\text{kN} + 311,0\text{kN}) = \underline{1101\text{kN}}$$

4.2.2.3.4 maximal aufnehmbare Kraft der Schraubenverbindung

$$F_{b,Rd} = \min \begin{cases} F_{v,Ed} \\ F_{b,Rd,IPB} \\ F_{b,Rd,Stirnplatte} \end{cases}$$

$$F_{b,Rd} = 550\text{kN} = \min \begin{cases} 550\text{kN} \\ 2332,8\text{kN} \\ 1101\text{kN} \end{cases}$$

4.2.2.3.5 Nachweis

$$\frac{V_z}{F_{b,Rd}} = \frac{470\text{kN}}{550\text{kN}} = \underline{0,85} < 1 \text{ Nachweis erfüllt!}$$

4.2.2.4 Nachweis Blockversagen

Zentrische Belastung:

$$V_{\text{eff},1,Rd} = A_{nt} * \frac{f_u}{\gamma_{M2}} + A_{nv} * \frac{f_y}{\sqrt{3} * \gamma_{M0}}$$

$$\gamma_{M2} = 1,25$$

$$\gamma_{M0} = 1,0$$

f_u und f_y sind nach Anlage 2 zu ermitteln

$$A_{nt} = (p_2 - d_0) * t = (120\text{mm} - 30\text{mm}) * 16\text{mm} = 1440\text{mm}^2$$

$$\begin{aligned} A_{nv} &= 2 * ((p_1 + e_1) - 1,5 * d_0) * t \\ &= 2 * ((120\text{mm} + 70\text{mm}) - 1,5 * 30\text{mm}) * 16\text{mm} = 4640\text{mm}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} V_{\text{eff},1,Rd} &= A_{nt} * \frac{f_u}{\gamma_{M2}} + A_{nv} * \frac{f_y}{\sqrt{3} * \gamma_{M0}} \\ &= 1440\text{mm}^2 * \frac{0,36 \frac{\text{kN}}{\text{mm}^2}}{1,25} + 4640\text{mm}^2 * \frac{0,235 \frac{\text{kN}}{\text{mm}^2}}{\sqrt{3} * 1,0} = 1044,37\text{kN} \end{aligned}$$

$$\frac{V_z}{V_{\text{eff},1,Rd}} = \frac{470\text{kN}}{1044,37\text{kN}} = \underline{0,45} < 1 \text{ Nachweis erfüllt}$$

4.2.3 Ergebnisvergleich

Tabelle 39 Ergebnisvergleich Stirnplatte 2

Vergleich	Aufnehmbare Kraft in kN nach DIN 18800	Aufnehmbare Kraft in kN nach Eurocode	Prozentuale Auswertung*
Steg	475	511,59	107,7%
Schweißnaht	646,7	618,53	95,7%
Abscheren	625	550	88,0%
Lochleibung IPB	2120,8	2322,8	109,5%
Lochleibung Stirnplatte	991,6	1101	111,0%
Risslinie / Blockversagen	928,69	1044,37	112,6%

*: der maximal aufnehmbaren Kraft nach Eurocode, wenn die DIN mit 100% angenommen wird

4.3 Prozentuale Auswertung Stirnplatte

Tabelle 40 Prozentuale Auswertung Stirnplatte

Vergleich	Stirnplatte 1 Prozentuale Auswertung*	Stirnplatte 2 Prozentuale Auswertung*
Steg	107,7%	107,7%
Schweißnaht	94,9%	95,7%
Abscheren	88,0%	88,0%
Lochleibung IPB	108,3%	109,5%
Lochleibung Stirnplatte	106,7%	111,0%
Risslinie / Blockversagen	100,2%	112,6%

*: der maximal aufnehmbaren Kraft nach Eurocode, wenn die DIN mit 100% angenommen wird

5 Vergleichsrechnung Doppelwinkel

Wie bereits im Kapitel 4 der Bachelorarbeit soll anhand einer Vergleichsrechnung die Abweichungen der Regelwerke in einer Berechnung aufgezeigt werden. Hierfür wird in diesem Fall ein Doppelwinkelanschluss als Beispiel gewählt. Für eine bessere Vergleichbarkeit werden die Ergebnisse der einzelnen Nachweise tabellarisch gegenübergestellt. Um Rückschlüsse auf die Ursache der eventuellen Abweichungen schließen zu können, wurde zwei Varianten des Anschlusses herangezogen. Die zweite Variante unterscheidet sich erheblich in Profilabmessung, Schraubengröße, Schraubenabständen und Schweißnahtdicken. So soll eine eventuelle Abhängigkeit der Ergebnisse von Materialdicken sichtbar werden.

5.1 Doppelwinkelvariante 1

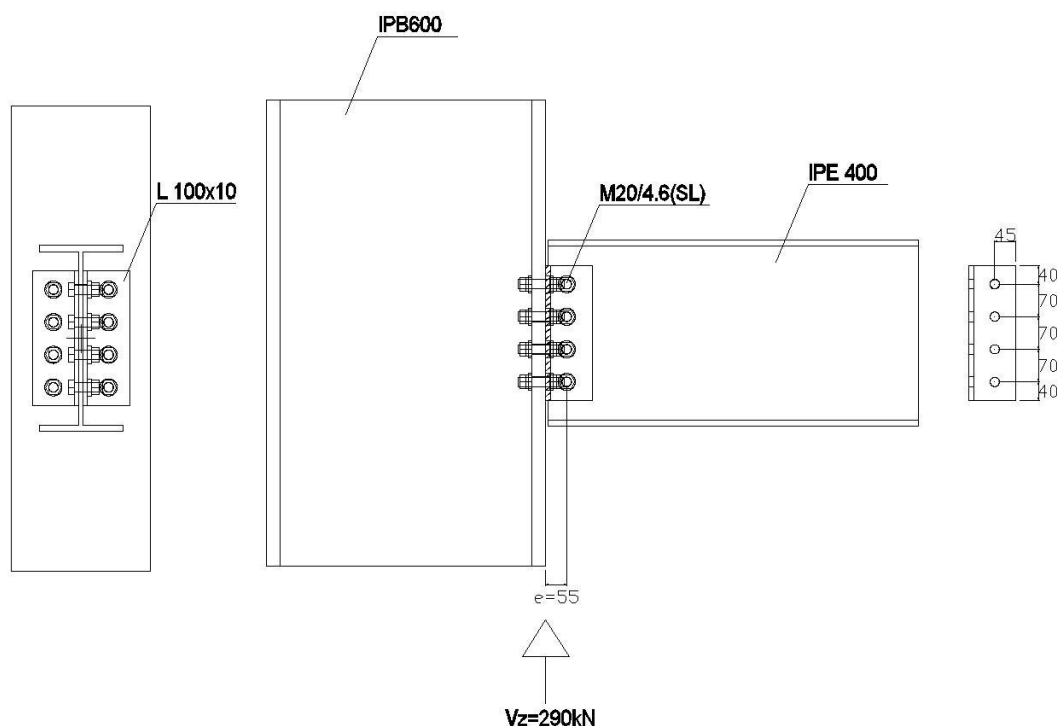


Abbildung 19 Doppelwinkelanschluss Variante 1

5.1.1 Doppelwinkel 1 nach DIN

5.1.1.1 Untersuchung des Trägertseges

IPE 400 DIN 1025 T5 S235

gegeben:

$$V_z = 290 \text{ kN}$$

$$f_{y,k} = 240 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$A_{\text{Gurt}} = b * t = 180 \text{ mm} * 13,5 \text{ mm} = 2400 \text{ mm}^2$$

$$A_{\text{Steg}} = h_1 * s = 331 \text{ mm} * 8,6 \text{ mm} = 2846,6 \text{ mm}^2$$

Nachweisführung:

$$\text{wenn } \frac{A_{\text{Gurt}}}{A_{\text{Steg}}} > 0,6 \text{ dann gilt, } \tau = \frac{V_z}{A_{\text{Steg}}}$$

$$\frac{A_{\text{Gurt}}}{A_{\text{Steg}}} = \frac{2400 \text{ mm}^2}{2846,6 \text{ mm}^2} = 0,84 > 0,6$$

$$\tau = \frac{V_z}{A_{\text{Steg}}} = \frac{290 * 10^3 \text{ N}}{2846,6 \text{ mm}^2} = 101,9 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$\tau_{R,d} = \frac{f_{y,k}}{\sqrt{3} * \gamma_M} = \frac{240 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}}{\sqrt{3} * 1,1} = 126 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$\frac{\tau}{\tau_{R,d}} = \frac{101,9 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}}{126 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}} = 0,81 < 1,0 \quad \text{Nachweis erfüllt}$$

maximal aufnehmbare Kraft des Trägersteges

$$V_{z,\text{max}} = \tau_{R,d} * A_{\text{Steg}} = 126 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} * 2846,6 \text{ mm}^2 = 358,67 \text{ kN}$$

5.1.1.2 Ermittlung der resultierenden Schraubenkraft

Vorhanden: 4 Schrauben M20/4.6(SL), Gewinde außerhalb der Scherfuge

Beanspruchung durch V_z und einen Moment durch einen Abstand zum Träger

Resultierende Schraubenkraft

$$N_z = \frac{V_z}{4} = \frac{290\text{kN}}{4} = 72,5\text{kN}$$

$$N_x = \frac{M}{h} * f$$

$$f = 0,9$$

$$h = 3 * h_{\text{Schraubenbild}} = 3 * 70\text{mm} = 210\text{mm}$$

$$M = V_z * e = 290\text{kN} * 0,055\text{m} = 15,95\text{kNm}$$

$$N_x = \frac{15,95\text{kNm}}{0,21\text{m}} * 0,90 = 68,36\text{kN}$$

$$N_R = \sqrt{N_x^2 + N_z^2} = \sqrt{68,36^2 + 72,5^2} = 99,65\text{kN}$$

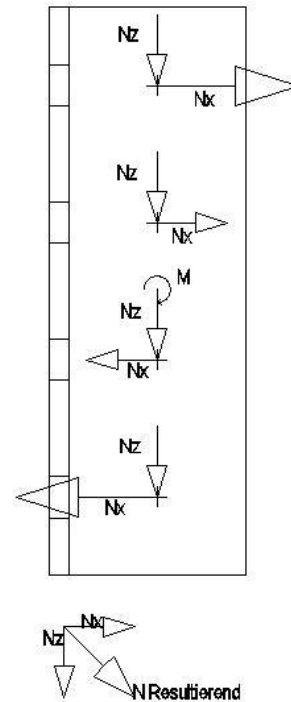


Abbildung 20 Schraubenkraft

5.1.1.3 Nachweis der Schrauben (Verbindung Doppelwinkel IPE 400)

5.1.1.3.1 Ermittlung Grenzabscherkraft

$$V_{a,R,d} = A * m * \alpha_a * \frac{f_{u,b,k}}{\gamma_M}$$

$A = 314 \text{ mm}^2$ nach Anlage 2 für M20 (SL) Gewinde außerhalb der Scherfuge

$$m = 2$$

$\alpha_a = 0,6$ für Schrauben der Festigkeitsklasse 4.6

$$f_{u,b,k} = 400 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \text{ nach Anlage 1}$$

$$\gamma_M = 1,1$$

$$V_{a,R,d} = A * m * \alpha_a * \frac{f_{u,b,k}}{\gamma_M} = 314\text{mm}^2 * 2 * 0,6 * \frac{0,4 \frac{\text{kN}}{\text{mm}^2}}{1,1} = \underline{137,02 \text{ kN}} \text{ /Schraube}$$

$$V_{a,Rd} = n * V_{a,R,d} = 4 * 137,02\text{kN} = \underline{548,08\text{kN}}$$

Nachweis:

$$\frac{N_R}{V_{a,Rd}} = \frac{99,65\text{kN}}{137,02\text{kN}} = \underline{0,73 < 1,0} \text{ Nachweis erfüllt}$$

5.1.1.3.2 Ermittlung der Grenzlochleibungskraft in Z-Richtung:

$$V_{l,R,d} = t * d_{Sch} * \sigma_{l,R,d}$$

$$\sigma_{l,R,d} = \alpha_l * \frac{f_{y,k}}{\gamma_M}$$

$$V_{l,R,d} = t * d_{Sch} * \alpha_l * \frac{f_{y,k}}{\gamma_M}$$

$$f_{y,k} = 240 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$d_{sch} = 20\text{mm}$$

$$\gamma_M = 1,1$$

$$\text{da } e_2 = 45 \text{ mm} \geq 1,5 * d_L = 1,5 * 21 = 31,5\text{mm}$$

Überprüfung der Schraubenabstände

$$t_{\text{Steg IPE 400}} = 8,2 \text{ mm}$$

$$t_{\text{Doppelwinkel}} = 2 * 10\text{mm} = 20\text{mm}$$

$$e_1: 1,2 * d_l = 1,2 * 21 = 25,2\text{mm} < e_1 = 40 \text{ mm} < 3 * d_l = 3 * 21 = 63\text{mm} \\ < 6 * t = 6 * 8,2 = 49,2\text{mm}$$

$$e_2: 1,2 * d_l = 1,2 * 21 = 25,2\text{mm} < e_2 = 45 \text{ mm} < 3 * d_l = 3 * 21 = 63\text{mm} \\ < 6 * t = 6 * 8,2 = 49,2\text{mm}$$

$$e \quad 2,2 * d_1 = 2,2 * 21 = 46,2\text{mm} \quad < e = 70\text{mm} \quad < 6 * d_1 = 6 * 21 = 126\text{mm} \\ < 12 * 8,2 = 12 * 8,2 \\ = 98,4\text{mm}$$

|| zur Krafrichtung IPE 400

$$\text{Innen: } \alpha_1 = 1,08 * \frac{e}{d_1} - 0,77 = 1,08 * \frac{70}{21} - 0,77 = 2,83$$

$$\text{Rand: } \alpha_1 = 1,1 * \frac{e_{1,\max}}{d_1} - 0,3 = 1,1 * \frac{49,2}{21} - 0,3 = 2,28$$

|| zur Krafrichtung Doppelwinkel

$$\text{Innen: } \alpha_1 = 1,08 * \frac{e}{d_1} - 0,77 = 1,08 * \frac{70}{21} - 0,77 = 2,83$$

$$\text{Rand: } \alpha_1 = 1,1 * \frac{e_1}{d_1} - 0,3 = 1,1 * \frac{40}{21} - 0,3 = 1,79$$

aufnehmbare Kraft IPE

$$V_{l,Rd} = t * d_{sch} * \alpha_1 * \frac{f_{y,k}}{\gamma_M}$$

$$t = \text{Steg IPE 400} = 8,2\text{mm}$$

$$V_{l,Rd,IPE,Rand,Z} = 8,2\text{mm} * 20\text{mm} * \frac{0,24 \frac{\text{kN}}{\text{mm}^2}}{1,1} * 2,28 = 81,58\text{kN}$$

$$V_{l,Rd,IPE,Innen,Z} = 8,2\text{mm} * 20\text{mm} * \frac{0,24 \frac{\text{kN}}{\text{mm}^2}}{1,1} * 2,83 = 101,26\text{kN}$$

$$V_{l,Rd,IPE,Z} = 2 * V_{l,Rd,Rand,Z} + 2 * V_{l,Rd,Innen,Z}$$

$$V_{l,Rd,IPE,Z} = 2 * 81,58\text{kN} + 2 * 101,26\text{kN} = \underline{\underline{365,68\text{kN}}}$$

aufnehmbare Kraft Doppelwinkel

$$V_{l,Rd} = t * d_{sch} * \alpha_l * \frac{f_{y,k}}{\gamma_M}$$

$$t = t_{Doppelwinkel} = 20\text{mm}$$

$$V_{l,Rd,Winkel,Rand,Z} = 20\text{mm} * 20\text{mm} * \frac{0,24 \frac{\text{kN}}{\text{mm}^2}}{1,1} * 1,79 = 156,22\text{kN}$$

$$V_{l,Rd,Winkel,Innen,Z} = 20\text{mm} * 20\text{mm} * \frac{0,24 \frac{\text{kN}}{\text{mm}^2}}{1,1} * 2,83 = 246,99\text{kN}$$

$$V_{l,Rd,Winkel,Z} = 2 * V_{l,Rd,Rand,Z} + 2 * V_{l,Rd,Innen,Z}$$

$$V_{l,Rd,Winkel,Z} = 2 * 156,22\text{kN} + 2 * 246,99\text{kN} = \underline{806,42\text{kN}}$$

maximal aufnehmbare Kraft der Schraubverbindung in Z-Richtung

$$V_{l,Rd} = \min \left\{ \begin{array}{l} V_{l,Rd,IPE,Z} \\ V_{l,Rd,Winkel,Z} \end{array} \right.$$

$$V_{l,Rd} = 365,68\text{kN} = \min \left\{ \begin{array}{l} 365,68\text{kN} \\ 806,42\text{kN} \end{array} \right.$$

Nachweis

$$\frac{V_z}{V_{l,Rd}} = \frac{290\text{kN}}{365,68\text{kN}} = \underline{0,79 < 1} \text{ Nachweis erfüllt!}$$

5.1.1.3.3 Ermittlung der Grenzlochleibungskraft in X-Richtung

$$V_{l,Rd} = t * d_{Sch} * \sigma_{l,Rd}$$

$$\sigma_{l,Rd} = \alpha_l * \frac{f_{y,k}}{\gamma_M}$$

$$V_{l,Rd} = t * d_{Sch} * \alpha_l * \frac{f_{y,k}}{\gamma_M}$$

$$f_{y,k} = 240 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$d_{\text{sch}} = 20\text{mm}$$

$$\gamma_M = 1,1$$

$$\text{da } e_2 = 40\text{ mm} \geq 1,5 * d_L = 1,5 * 21 = 31,5\text{mm}$$

Überprüfung der Schraubenabstände

$$t_{\text{Steg IPE 400}} = 8,2\text{ mm}$$

$$t_{\text{Doppelwinkel}} = 2 * 10\text{mm} = 20\text{mm}$$

$$e_1: 1,2 * d_l = 1,2 * 21 = 25,2\text{mm} \quad < e_1 = 45\text{ mm} \quad < 3 * d_l = 3 * 21 = 63\text{mm} \\ < 6 * t = 6 * 8,2 = 49,2\text{mm}$$

$$e_2: 1,2 * d_l = 1,2 * 21 = 25,2\text{mm} \quad < e_2 = 40\text{ mm} \quad < 3 * d_l = 3 * 21 = 63\text{mm} \\ < 6 * t = 6 * 8,2 = 49,2\text{mm}$$

$$e_3: 2,4 * d_l = 2,4 * 21 = 50,4\text{mm} \quad < e_3 = 70\text{mm} \quad < 6 * d_l = 6 * 21 = 126\text{mm} \\ < 12 * t = 12 * 8,2 \\ = 98,4\text{mm}$$

|| zur Kraftrichtung IPE 400

es gibt nur Randschrauben

$$\text{Rand: } \alpha_l = 1,1 * \frac{e_1}{d_l} - 0,3 = 1,1 * \frac{45}{21} - 0,3 = 2,06$$

|| zur Kraftrichtung Doppelwinkel

es gibt nur Randschrauben

$$\text{Rand: } \alpha_l = 1,1 * \frac{e_1}{d_l} - 0,3 = 1,1 * \frac{45}{21} - 0,3 = 2,06$$

aufnehmbare Kraft IPE

$$V_{l,Rd} = t * d_{sch} * \alpha_1 * \frac{f_{y,k}}{\gamma_M}$$

$$t = \text{Steg IPE 400} = 8,2\text{mm}$$

$$V_{l,Rd,IPE,Rand,X} = 8,2\text{mm} * 20\text{mm} * \frac{0,24 \frac{\text{kN}}{\text{mm}^2}}{1,1} * 2,06 = 73,71\text{kN}$$

$$V_{l,Rd,IPE,X} = 4 * V_{l,Rd,Rand,X}$$

$$V_{l,Rd,IPE,X} = 4 * 73,71\text{kN} = \underline{294,84\text{kN}}$$

aufnehmbare Kraft Doppelwinkel

$$V_{l,Rd} = t * d_{sch} * \alpha_1 * \frac{f_{y,k}}{\gamma_M}$$

$$t = t_{\text{Doppelwinkel}} = 20\text{mm}$$

$$V_{l,Rd,Winkel,Rand,X} = 20\text{mm} * 20\text{mm} * \frac{0,24 \frac{\text{kN}}{\text{mm}^2}}{1,1} * 2,06 = 179,78\text{kN}$$

$$V_{l,Rd,Winkel,X} = 4 * V_{l,Rd,Rand,X}$$

$$V_{l,Rd,Winkel,X} = 4 * 179,78\text{kN} = \underline{719,12\text{kN}}$$

maximal aufnehmbare Kraft der Schraubenverbindung in X-Richtung

$$V_{l,Rd} = \min \left\{ \begin{array}{l} V_{l,Rd,IPE,X} \\ V_{l,Rd,Winkel,X} \end{array} \right.$$

$$V_{l,Rd} = 294,84\text{kN} = \min \left\{ \begin{array}{l} 294,84\text{kN} \\ 719,12\text{kN} \end{array} \right.$$

Nachweis

$$\frac{N_X}{\frac{V_{l,Rd}}{4}} = \frac{68,36\text{kN}}{73,71} = \underline{0,93 < 1,0} \text{ Nachweis erfüllt}$$

5.1.1.4 Nachweis der Schrauben (Verbindung IPB 600 Winkel)

5.1.1.4.1 Ermittlung Grenzabscherkraft

$$V_{a,R,d} = A * m * \alpha_a * \frac{f_{u,b,k}}{\gamma_M}$$

$A = 314 \text{ mm}^2$ nach Anlage 2 für M20 (SL) Gewinde außerhalb der Scherfuge

$$m = 1$$

$\alpha_a = 0,6$ für Schrauben der Festigkeitsklasse 4.6

$$f_{u,b,k} = 400 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \text{ nach Anlage 1}$$

$$\gamma_M = 1,1$$

$$V_{a,R,d} = A * m * \alpha_a * \frac{f_{u,b,k}}{\gamma_M} = 314\text{mm}^2 * 1 * 0,6 * \frac{0,4 \frac{\text{kN}}{\text{mm}^2}}{1,1} = \underline{68,51 \text{ kN}} \text{ /Schraube}$$

$$V_{a,Rd} = n * V_{a,R,d} = 8 * 68,51\text{kN} = \underline{548,08\text{kN}}$$

Nachweis:

$$\frac{V_z}{V_{a,Rd}} = \frac{290\text{kN}}{548,08\text{kN}} = \underline{0,53 < 1,0} \text{ Nachweis erfüllt}$$

5.1.1.4.2 Ermittlung der Grenzlochleibungskraft in Z-Richtung

$$V_{l,R,d} = t * d_{\text{Sch}} * \sigma_{l,R,d}$$

$$\sigma_{l,R,d} = \alpha_l * \frac{f_{y,k}}{\gamma_M}$$

$$V_{l,R,d} = t * d_{\text{Sch}} * \alpha_l * \frac{f_{y,k}}{\gamma_M}$$

$$f_{y,k} = 240 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$d_{\text{sch}} = 20\text{mm}$$

$$\gamma_M = 1,1$$

$$\text{da, } e_2 = 45 \text{ mm} \geq 1,5 * d_L = 1,5 * 21 = 31,5\text{mm}$$

Überprüfung der Schraubenabstände

$$t_{\text{Gurt IPB 600}} = 30 \text{ mm}$$

$$t_{\text{Winkel}} = 10\text{mm}$$

$$e_1: 1,2 * d_1 = 1,2 * 21 = 25,2\text{mm} < e_1 = 40 \text{ mm} < 3 * d_1 = 3 * 21 = 63\text{mm} \\ < 6 * t = 6 * 10 = 60\text{mm}$$

$$e_2: 1,2 * d_1 = 1,2 * 21 = 25,2\text{mm} < e_2 = 45 \text{ mm} < 3 * d_1 = 3 * 21 = 63\text{mm} \\ < 6 * t = 6 * 10 = 60\text{mm}$$

$$e \quad 2,2 * d_1 = 2,2 * 21 = 46,2\text{mm} < e = 70\text{mm} < 6 * d_1 = 6 * 21 = 126\text{mm} \\ < 12 * t = 12 * 10 = 120\text{mm}$$

|| zur Kraftrichtung IPB 600

$$\text{Innen: } \alpha_1 = 1,08 * \frac{e}{d_1} - 0,77 = 1,08 * \frac{70}{21} - 0,77 = 2,83$$

$$\text{Rand: } \alpha_1 = 1,1 * \frac{e_{1,\text{max}}}{d_1} - 0,3 = 1,1 * \frac{60}{21} - 0,3 = 2,84$$

|| zur Kraftrichtung Winkel

$$\text{Innen: } \alpha_1 = 1,08 * \frac{e}{d_1} - 0,77 = 1,08 * \frac{70}{21} - 0,77 = 2,83$$

$$\text{Rand: } \alpha_1 = 1,1 * \frac{e_1}{d_1} - 0,3 = 1,1 * \frac{40}{21} - 0,3 = 1,79$$

aufnehmbare Kraft IPB

$$V_{l,Rd} = t * d_{sch} * \alpha_1 * \frac{f_{y,k}}{\gamma_M}$$

$$t = \text{Gurt IPB 600} = 30\text{mm}$$

$$V_{l,Rd,IPB,Rand,Z} = 30\text{mm} * 20\text{mm} * \frac{0,24 \frac{\text{kN}}{\text{mm}^2}}{1,1} * 2,84 = 371,79\text{kN}$$

$$V_{l,Rd,IPB,Innen,Z} = 30\text{mm} * 20\text{mm} * \frac{0,24 \frac{\text{kN}}{\text{mm}^2}}{1,1} * 2,83 = 371,78\text{kN}$$

$$V_{l,Rd,IPB,Z} = 4 * V_{l,Rd,Rand,Z} + 4 * V_{l,Rd,Innen,Z}$$

$$V_{l,Rd,IPB,Z} = 4 * 371,79\text{kN} + 4 * 371,78\text{kN} = \underline{2974,28\text{kN}}$$

aufnehmbare Kraft Winkel

$$V_{l,Rd} = t * d_{sch} * \alpha_1 * \frac{f_{y,k}}{\gamma_M}$$

$$t = t_{lwinkel} = 10\text{mm}$$

$$V_{l,Rd,Winkel,Rand,Z} = 10\text{mm} * 20\text{mm} * \frac{0,24 \frac{\text{kN}}{\text{mm}^2}}{1,1} * 1,79 = 78,11\text{kN}$$

$$V_{l,Rd,Winkel,Innen,Z} = 10\text{mm} * 20\text{mm} * \frac{0,24 \frac{\text{kN}}{\text{mm}^2}}{1,1} * 2,83 = 123,49\text{kN}$$

$$V_{l,Rd,Winkel,Z} = 4 * V_{l,Rd,Rand,Z} + 4 * V_{l,Rd,Innen,Z}$$

$$V_{l,Rd,Winkel,Z} = 4 * 78,11\text{kN} + 4 * 123,49\text{kN} = \underline{806,4\text{kN}}$$

maximal aufnehmbare Kraft der Schraubenverbindung in Z-Richtung

$$V_{l,Rd} = \min \begin{cases} V_{l,Rd,IPB,Z} \\ V_{l,Rd,Winkel,Z} \end{cases}$$

$$V_{l,Rd} = 806,4\text{kN} = \min \begin{cases} 2974,28\text{kN} \\ 806,4\text{kN} \end{cases}$$

Nachweis

$$\frac{V_z}{V_{l,Rd}} = \frac{290\text{kN}}{806,4\text{kN}} = \underline{0,36 < 1} \text{ Nachweis erfüllt!}$$

5.1.2 Doppelwinkel 1 nach Eurocode

5.1.2.1 Untersuchung des Trägersteges

IPE 400 DIN 1025 T5 S235

gegeben:

$$V_z = 290 \text{ kN}$$

$$f_y = 235 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$A_{\text{Steg}} = h_1 * s = 331 \text{ mm} * 8,6 \text{ mm} = 2846,6 \text{ mm}^2$$

Nachweisführung:

$$\tau = \frac{V_z}{A_{\text{Steg}}} = \frac{290 * 10^3 \text{ N}}{2846,6 \text{ mm}^2} = 101,9 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$\frac{\tau}{\frac{f_y}{\sqrt{3} * \gamma_{M,0}}} \leq 1$$

$$\frac{101,9 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}}{\frac{235 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}}{\sqrt{3} * 1,0}} = \frac{101,9 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}}{135,7 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}} = 0,75 < 1 \text{ Nachweis erfüllt}$$

maximal aufnehmbare Kraft des Trägersteges

$$V_{z,\text{max}} = \frac{f_y}{\sqrt{3} * \gamma_{M,0}} * A_{\text{Steg}} = \frac{235 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}}{\sqrt{3} * 1,0} * 2846,6 \text{ mm}^2 = 386,6 \text{ kN}$$

5.1.2.2 Ermittlung der resultierenden Schraubenkraft

Vorhanden: 4 Schrauben M20/4.6 (Kategorie A), Gewinde außerhalb der Scherfuge

Beanspruchung durch V_z und einen Moment durch einen Abstand zum Träger

Resultierende Schraubenkraft

$$N_z = \frac{V_z}{4} = \frac{290\text{kN}}{4} = 72,5\text{kN}$$

$$N_x = \frac{M}{h} * f$$

$$f = 0,9$$

$$h = 3 * h_{\text{Schraubenbild}} = 3 * 70\text{mm} = 210\text{mm}$$

$$M = V_z * e = 290\text{kN} * 0,055\text{m} = 15,95\text{kNm}$$

$$N_x = \frac{15,95\text{kNm}}{0,21\text{m}} * 0,90 = 68,36\text{kN}$$

$$N_R = \sqrt{N_x^2 + N_z^2} = \sqrt{68,36^2 + 72,5^2} = 99,65\text{kN}$$

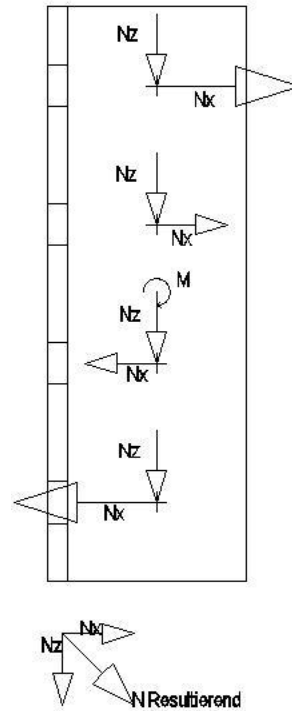


Abbildung 21 Schraubenkraft

5.1.2.3 Nachweis der Schrauben (verbindung Doppelwinkel IPE 400)

5.1.2.3.1 Ermittlung Grenzabscherkraft

$$F_{v,Rd} = \frac{\alpha_v * f_{ub} * A}{\gamma_{M2}}$$

$A = 314 \text{ mm}^2$ nach Anlage 2 für M20 (Kategorie 1) Gewinde außerhalb der Scherfuge

$\alpha_v = 0,6$ für abgesicherten Schaft und allen Festigkeitsklassen

$$m=2$$

$$f_{ub} = 400 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \text{ nach Anlage 1}$$

$$\gamma_{M2} = 1,25$$

$$F_{v,Rd} = \frac{m * \alpha_v * f_{ub} * A}{\gamma_{M2}} = \frac{2 * 0,6 * 0,4 \frac{\text{kN}}{\text{mm}^2} * 314\text{mm}^2}{1,25} = \underline{120,58\text{kN} / \text{Schraube}}$$

$$F_{v,Rd} = n * F_{v,Rd} = 4 * 120,58\text{kN} = 482,32\text{kN}$$

Nachweis:

$$\frac{N_R}{F_{v,Rd}} = \frac{99,65\text{kN}}{120,58\text{kN}} = \underline{0,83 < 1,0} \text{ Nachweis erfüllt}$$

5.1.2.3.2 Ermittlung der Grenzlochleibungskraft in Z-Richtung

$$F_{b,Rd} = k_1 * \alpha_b * d * t * \frac{f_u}{\gamma_{M2}}$$

$$f_u = 360 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$d = 20\text{mm}$$

$$d_o = 21\text{mm}$$

$$\gamma_{M2} = 1,25$$

$$f_{u,b} = 400 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Überprüfung der Schraubenabstände

$$t_{\text{Steg IPE 400}} = 8,2\text{mm}$$

$$t_{\text{Doppelwinkel}} = 2 * 10\text{mm} = 20\text{mm}$$

$$e_1: 1,2 * d_o = 1,2 * 21 = 25,2\text{mm} < e_1 = 40\text{mm} < 4t + 40\text{mm} = 4 * 8,2 + 40 \\ = 72,8\text{mm}$$

$$e_2: 1,2 * d_o = 1,2 * 21 = 25,2\text{mm} < e_2 = 45\text{mm} < 4t + 40\text{mm} = 4 * 8,2 + 40 \\ = 72,8\text{mm}$$

$$p_1: 2,2 * d_o = 2,2 * 21 = 46,2\text{mm} < p_1 = 70\text{mm} < \min \begin{cases} 14 * t = 114,8\text{mm} \\ 200\text{mm} \end{cases}$$

⊥ zur Krafrichtung

$$p_{2,\max} = 14 * 8,2 = 114,8\text{mm}$$

$$\text{Innen: } k_1 = 2,5 = \min \left\{ \frac{1,4 * \frac{p_2}{d_0} - 1,7}{2,5} = \min \left\{ \frac{1,4 * \frac{114,8}{21} - 1,7}{2,5} = 5,95 \right. \right.$$

$$\text{Rand: } k_1 = 2,5 = \min \left\{ \begin{array}{l} \frac{2,8 * \frac{e_2}{d_0} - 1,7}{2,5} \\ \frac{1,4 * \frac{p_2}{d_0} - 1,7}{2,5} \end{array} = \min \left\{ \begin{array}{l} \frac{2,8 * \frac{45}{21} - 1,7}{2,5} = 4,3 \\ \frac{1,4 * \frac{114,8}{21} - 1,7}{2,5} = 5,95 \end{array} \right. \right.$$

|| zur Krafrichtung, Randschraube

$$\text{IPE: } \alpha_d = \frac{e_{1,\max}}{3 * d_0} = \frac{72,8}{3 * 21} = 1,16$$

$$\text{Doppelwinkel: } \alpha_d = \frac{e_1}{3 * d_0} = \frac{40}{3 * 21} = 0,634$$

|| zur Krafrichtung, Innenschraube

$$\text{IPE: } \alpha_d = \frac{p_1}{3 * d_0} - 0,25 = \frac{70}{3 * 21} - 0,25 = 0,86$$

$$\text{Doppelwinkel: } \alpha_d = \frac{p_1}{3 * d_0} - 0,25 = \frac{70}{3 * 21} - 0,25 = 0,86$$

Aufnehmbare Kraft IPE

$$t = \text{Steg IPE 400} = 8,2\text{mm}$$

Randbereich

$$k_1 = 2,5$$

$$a_b = 1,0 = \min \left\{ \begin{array}{l} a_d \\ \frac{f_{ub}}{f_u} \\ 1,0 \end{array} = \min \left\{ \begin{array}{l} 1,16 \\ \frac{400}{360} = 1,11 \\ 1,0 \end{array} \right. \right.$$

$$F_{b,Rd} = k_1 * \alpha_b * d * t * \frac{f_u}{\gamma_{M2}}$$

$$F_{b,Rd} = 2,5 * 1,0 * 20\text{mm} * 8,2\text{mm} * \frac{0,36 \frac{\text{kN}}{\text{mm}^2}}{1,25} = 118,08\text{kN}$$

Innenbereich

$$k_1 = 2,5$$

$$a_b = 1,0 = \min \left\{ \frac{a_d}{f_{ub}} = \min \left\{ \frac{0,86}{400} = 1,11 \right. \right.$$

$$\left. \left. \frac{f_u}{1,0} \right\} \right.$$

$$F_{b,Rd} = k_1 * \alpha_b * d * t * \frac{f_u}{\gamma_{M2}}$$

$$F_{b,Rd} = 2,5 * 0,86 * 20\text{mm} * 8,2\text{mm} * \frac{0,36 \frac{\text{kN}}{\text{mm}^2}}{1,25} = 101,55\text{kN}$$

Kombiniert für IPE

$$F_{b,Rd,IPE,Z} = 2 * (F_{b,Rd,Rand} + F_{b,Rd,Innen}) = 2 * (118,08\text{kN} + 101,55\text{kN})$$

$$= \underline{\underline{439,26\text{kN}}}$$

Aufnehmbare Kraft Doppelwinkel

$$t = t_{\text{Doppelwinkel}} = 2 * 10\text{mm} = 20\text{mm}$$

Randbereich

$$k_1 = 2,5$$

$$a_b = 0,634 = \min \left\{ \frac{a_d}{f_{ub}} = \min \left\{ \frac{0,634}{400} = 1,11 \right. \right.$$

$$\left. \left. \frac{f_u}{1,0} \right\} \right.$$

$$F_{b,Rd} = k_1 * \alpha_b * d * t * \frac{f_u}{\gamma_{M2}}$$

$$F_{b,Rd} = 2,5 * 0,634 * 20\text{mm} * 20\text{mm} * \frac{0,36 \frac{\text{kN}}{\text{mm}^2}}{1,25} = 182,59\text{kN}$$

Innenbereich

$$k_1 = 2,5$$

$$a_b = 0,86 = \min \left\{ \frac{a_d}{f_u} = \min \left\{ \frac{0,86}{360} = 1,11 \right. \right.$$

$$F_{b,Rd} = k_1 * \alpha_b * d * t * \frac{f_u}{\gamma_{M2}}$$

$$F_{b,Rd} = 2,5 * 0,86 * 20\text{mm} * 20\text{mm} * \frac{0,36 \frac{\text{kN}}{\text{mm}^2}}{1,25} = 247,68\text{kN}$$

Kombiniert für Doppelwinkel

$$F_{b,Rd,Winkel,Z} = 2 * (F_{b,Rd,Rand} + F_{b,Rd,Innen}) = 2 * (182,59\text{kN} + 247,68\text{kN}) \\ = \underline{\underline{860,54\text{kN}}}$$

maximal aufnehmbare Kraft der Schraubenverbindung in Z-Richtung

$$F_{b,Rd} = \min \left\{ \begin{array}{l} F_{b,Rd,IPE,Z} \\ F_{b,Rd,Winkel,Z} \end{array} \right.$$

$$F_{b,Rd} = 439,26\text{kN} = \min \left\{ \begin{array}{l} 439,26\text{kN} \\ 860,54\text{kN} \end{array} \right.$$

Nachweis

$$\frac{V_z}{F_{b,Rd}} = \frac{290\text{kN}}{439,26\text{kN}} = \underline{\underline{0,66 < 1,0}} \text{ Nachweis erfüllt}$$

5.1.2.3.3 Ermittlung der Grenzlochleibungskraft in X-Richtung

$$F_{b,Rd} = k_1 * \alpha_b * d * t * \frac{f_u}{\gamma_{M2}}$$

$$f_u = 360 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$d = 20\text{mm}$$

$$d_o = 21\text{mm}$$

$$\gamma_{M2} = 1,25$$

$$f_{u,b} = 400 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Überprüfung der Schraubenabstände

$$t_{\text{Steg IPE 400}} = 8,2\text{mm}$$

$$t_{\text{Doppelwinkel}} = 2 * 10\text{mm} = 20\text{mm}$$

$$e_1: 1,2 * d_o = 1,2 * 21 = 25,2\text{mm} < e_1 = 45 \text{ mm} < 4t + 40\text{mm} = 4 * 8,2 + 40 \\ = 72,8\text{mm}$$

$$e_2: 1,2 * d_o = 1,2 * 21 = 25,2\text{mm} < e_2 = 40 \text{ mm} < 4t + 40\text{mm} = 4 * 8,2 + 40 \\ = 72,8\text{mm}$$

$$p_2: 2,4 * d_o = 2,4 * 21 = 50,4\text{mm} < p_2 = 70\text{mm} < \min \begin{cases} 14 * t = 114,8\text{mm} \\ 200\text{mm} \end{cases}$$

⊥ zur Kraftrichtung

$$\text{Innen: } k_1 = 2,5 = \min \left\{ \frac{1,4 * \frac{p_2}{d_o} - 1,7}{2,5} = \min \left\{ \frac{1,4 * \frac{70}{21} - 1,7}{2,5} = 2,966 \right. \right.$$

$$\text{Rand: } k_1 = 2,5 = \min \left\{ \begin{array}{l} \frac{2,8 * \frac{e_2}{d_o} - 1,7}{2,5} \\ \frac{1,4 * \frac{p_2}{d_o} - 1,7}{2,5} \end{array} = \min \left\{ \begin{array}{l} \frac{2,8 * \frac{40}{21} - 1,7}{2,5} = 3,63 \\ \frac{1,4 * \frac{70}{21} - 1,7}{2,5} = 2,966 \end{array} \right. \right.$$

|| zur Kraftrichtung, Randschraube

$$\text{IPE: } \alpha_d = \frac{e_1}{3 * d_o} = \frac{45}{3 * 21} = 0,71$$

$$\text{Doppelwinkel: } \alpha_d = \frac{e_1}{3 * d_o} = \frac{45}{3 * 21} = 0,71$$

Aufnehmbare Kraft IPE

$$t = \text{Steg IPE 400} = 8,2\text{mm}$$

Randbereich

$$k_1 = 2,5$$

$$a_b = 0,71 = \min \left\{ \frac{a_d}{f_{ub}}, \frac{a_d}{f_u} \right\} = \min \left\{ \frac{0,71}{400}, \frac{0,71}{360} \right\} = 1,11$$

$$F_{b,Rd} = k_1 * \alpha_b * d * t * \frac{f_u}{\gamma_{M2}}$$

$$F_{b,Rd} = 2,5 * 0,71 * 20\text{mm} * 8,2\text{mm} * \frac{0,36 \frac{\text{kN}}{\text{mm}^2}}{1,25} = 83,84\text{kN}$$

Kombiniert für IPE

$$F_{b,Rd,IPE,X} = 4 * F_{b,Rd,Rand} = 4 * 83,84\text{kN} = \underline{\underline{335,36\text{kN}}}$$

Aufnehmbare Kraft Doppelwinkel

$$t = t_{\text{Doppelwinkel}} = 2 * 10\text{mm} = 20\text{mm}$$

Randbereich

$$k_1 = 2,5$$

$$a_b = 0,71 = \min \left\{ \frac{a_d}{f_{ub}}, \frac{a_d}{f_u} \right\} = \min \left\{ \frac{0,71}{400}, \frac{0,71}{360} \right\} = 1,11$$

$$F_{b,Rd} = k_1 * \alpha_b * d * t * \frac{f_u}{\gamma_{M2}}$$

$$F_{b,Rd} = 2,5 * 0,71 * 20\text{mm} * 20\text{mm} * \frac{0,36 \frac{\text{kN}}{\text{mm}^2}}{1,25} = 204,48\text{kN}$$

Kombiniert für Doppelwinkel

$$F_{b,Rd,Winkel,x} = 4 * F_{b,Rd,Rand} = 4 * 204,48 = \underline{817,92\text{kN}}$$

maximal aufnehmbare Kraft der Schraubenverbindung in Z-Richtung

$$F_{b,Rd} = \min \left\{ \begin{array}{l} F_{b,Rd,IPE,x} \\ F_{b,Rd,Winkel,x} \end{array} \right.$$

$$F_{b,Rd} = 335,36\text{kN} = \min \left\{ \begin{array}{l} 335,36\text{kN} \\ 817,92\text{kN} \end{array} \right.$$

Nachweis

$$\frac{N_x}{\frac{F_{b,Rd}}{4}} = \frac{68,36\text{kN}}{83,84\text{kN}} = \underline{0,82 < 1,0} \text{ Nachweis erfüllt}$$

5.1.2.4 Nachweis der Schrauben (Verbindung IPB 600 Winkel)

5.1.2.4.1 Ermittlung Grenzabscherkraft

$$F_{v,Rd} = \frac{\alpha_v * f_{ub} * A}{\gamma_{M2}}$$

$A = 314 \text{ mm}^2$ nach Anlage 2 für M20 (Kategorie 1) Gewinde außerhalb der Scherfuge

$\alpha_v = 0,6$ für abgescherten Schaft und allen Festigkeitsklassen

$m=1$

$$f_{ub} = 400 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \text{ nach Anlage 1}$$

$$\gamma_{M2} = 1,25$$

$$F_{v,Rd} = \frac{m * \alpha_v * f_{ub} * A}{\gamma_{M2}} = \frac{1 * 0,6 * 0,4 \frac{\text{kN}}{\text{mm}^2} * 314 \text{mm}^2}{1,25} = \underline{60,29 \text{kN}} / \text{Schraube}$$

$$F_{v,Rd} = n * F_{v,Rd} = 8 * 60,29 \text{kN} = 482,30 \text{kN}$$

Nachweis:

$$\frac{V_z}{F_{v,Rd}} = \frac{290 \text{kN}}{482,30 \text{kN}} = \underline{0,60 < 1,0} \text{ Nachweis erfüllt}$$

5.1.2.4.2 Ermittlung der Grenzlochleibungskraft in Z-Richtung

$$F_{b,Rd} = k_1 * \alpha_b * d * t * \frac{f_u}{\gamma_{M2}}$$

$$f_u = 360 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$d = 20 \text{mm}$$

$$d_o = 21 \text{mm}$$

$$\gamma_{M2} = 1,25$$

$$f_{u,b} = 400 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Überprüfung der Schraubenabstände

$$t_{\text{Gurt IPB 600}} = 30 \text{mm}$$

$$t_{\text{Winkel}} = 10 \text{mm}$$

$$e_1: 1,2 * d_o = 1,2 * 21 = 25,2 \text{mm} < e_1 = 40 \text{mm} < 4t + 40 \text{mm} = 4 * 10 + 40 = 80 \text{mm}$$

$$e_2: 1,2 * d_o = 1,2 * 21 = 25,2 \text{mm} < e_2 = 45 \text{mm} < 4t + 40 \text{mm} = 4 * 10 + 40 = 80 \text{mm}$$

$$p_1: 2,2 * d_o = 2,2 * 21 = 46,2 \text{mm} < p_1 = 70 \text{mm} < \min \begin{cases} 14 * t = 140 \text{mm} \\ 200 \text{mm} \end{cases}$$

⊥ zur Kraftrichtung

$$p_{2,\max} = 14 * t = 140\text{mm}$$

$$\text{Innen: } k_1 = 2,5 = \min \left\{ \frac{1,4 * \frac{p_{2,\max}}{d_o}}{2,5} - 1,7 = \min \left\{ \frac{1,4 * \frac{140}{21}}{2,5} - 1,7 = 7,633 \right. \right.$$

$$\text{Rand: } k_1 = 2,5 = \min \left\{ \begin{array}{l} \frac{2,8 * \frac{e_2}{d_o}}{2,5} - 1,7 \\ \frac{1,4 * \frac{p_{2,\max}}{d_o}}{2,5} - 1,7 \end{array} \right. = \min \left\{ \begin{array}{l} \frac{2,8 * \frac{45}{21}}{2,5} - 1,7 = 4,3 \\ \frac{1,4 * \frac{140}{21}}{2,5} - 1,7 = 7,633 \end{array} \right.$$

|| zur Kraftrichtung, Randschraube

$$\text{IPB: } \alpha_d = \frac{e_{1,\max}}{3 * d_o} = \frac{80}{3 * 21} = 1,26$$

$$\text{Winkel: } \alpha_d = \frac{e_1}{3 * d_o} = \frac{40}{3 * 21} = 0,634$$

|| zur Kraftrichtung, Innenschraube

$$\text{IPB: } \alpha_d = \frac{p_1}{3 * d_o} - 0,25 = \frac{70}{3 * 21} - 0,25 = 0,86$$

$$\text{Winkel: } \alpha_d = \frac{p_1}{3 * d_o} - 0,25 = \frac{70}{3 * 21} - 0,25 = 0,86$$

Aufnehmbare Kraft IPB

$$t = \text{Gurt IPB 600} = 30\text{mm}$$

Randbereich

$$k_1 = 2,5$$

$$a_b = 1,0 = \min \left\{ \begin{array}{l} \frac{a_d}{f_{ub}} \\ \frac{f_u}{1,0} \end{array} \right. = \min \left\{ \begin{array}{l} \frac{1,26}{\frac{400}{360}} \\ 1,0 \end{array} \right. = 1,11$$

$$F_{b,Rd} = k_1 * \alpha_b * d * t * \frac{f_u}{\gamma_{M2}}$$

$$F_{b,Rd} = 2,5 * 1,0 * 20\text{mm} * 30\text{mm} * \frac{0,36 \frac{\text{kN}}{\text{mm}^2}}{1,25} = 432\text{kN}$$

Innenbereich

$$k_1 = 2,5$$

$$a_b = 1,0 = \min \left\{ \frac{a_d}{f_{ub}} = \min \left\{ \frac{0,86}{400} = 1,11 \right. \right.$$

$$\left. \left. \frac{f_u}{1,0} \right. \right.$$

$$F_{b,Rd} = k_1 * \alpha_b * d * t * \frac{f_u}{\gamma_{M2}}$$

$$F_{b,Rd} = 2,5 * 0,86 * 20\text{mm} * 30\text{mm} * \frac{0,36 \frac{\text{kN}}{\text{mm}^2}}{1,25} = 371,52\text{kN}$$

Kombiniert für IPE

$$F_{b,Rd,IPB,Z} = 4 * (F_{b,Rd,Rand} + F_{b,Rd,Innen}) = 4 * (432\text{kN} + 371,52\text{kN}) = \underline{\underline{3214,08\text{kN}}}$$

Aufnehmbare Kraft Winkel

$$t = t_{\text{Winkel}} = 10\text{mm}$$

Randbereich

$$k_1 = 2,5$$

$$a_b = 0,634 = \min \left\{ \frac{a_d}{f_{ub}} = \min \left\{ \frac{0,634}{400} = 1,11 \right. \right.$$

$$\left. \left. \frac{f_u}{1,0} \right. \right.$$

$$F_{b,Rd} = k_1 * \alpha_b * d * t * \frac{f_u}{\gamma_{M2}}$$

$$F_{b,Rd} = 2,5 * 0,634 * 20\text{mm} * 10\text{mm} * \frac{0,36 \frac{\text{kN}}{\text{mm}^2}}{1,25} = 91,29\text{kN}$$

Innenbereich

$$k_1 = 2,5$$

$$a_b = 0,86 = \min \left\{ \frac{a_d}{f_u} = \min \left\{ \frac{0,86}{360} = 1,11 \right. \right.$$

$$F_{b,Rd} = k_1 * \alpha_b * d * t * \frac{f_u}{\gamma_{M2}}$$

$$F_{b,Rd} = 2,5 * 0,86 * 20\text{mm} * 10\text{mm} * \frac{0,36 \frac{\text{kN}}{\text{mm}^2}}{1,25} = 123,84\text{kN}$$

Kombiniert für Doppelwinkel

$$F_{b,Rd,Winkel,Z} = 4 * (F_{b,Rd,Rand} + F_{b,Rd,Innen}) = 4 * (91,29\text{kN} + 123,84\text{kN}) \\ = \underline{\underline{860,52\text{kN}}}$$

maximal aufnehmbare Kraft der Schraubenverbindung in Z-Richtung

$$F_{b,Rd} = \min \left\{ F_{b,Rd,IPB,X} \right.$$

$$F_{b,Rd} = 860,52\text{kN} = \min \left\{ \begin{array}{l} 3214,08\text{kN} \\ 860,52\text{kN} \end{array} \right.$$

Nachweis

$$\frac{V_Z}{F_{b,Rd}} = \frac{290\text{kN}}{860,52\text{kN}} = \underline{\underline{0,34 < 1,0}} \text{ Nachweis erfüllt}$$

5.1.3 Ergebnisvergleich

Tabelle 41 Ergebnisvergleich Doppelwinkel 1

	Vergleich	Aufnehmbare Kraft im kN nach DIN 18800	Aufnehmbare Kraft im kN nach Eurocode	Prozentuale Auswertung*
Allgemein	Trägersteg	358,67	386,6	107,7%
Doppelwinkel/ IPE 400	Abscheren	548,08	482,32	88,0%
	Leibung IPE in Z	365,68	439,26	120,1%
	Leibung Winkel in Z	806,42	860,54	106,7%
	Leibung IPE in X	294,84	335,36	113,7%
	Leibung Winkel in X	719,12	817,92	113,7%
Doppelwinkel/ IPB	Abscheren	548,08	482,30	88,0%
	Leibung IPB Z	2974,28	3214,08	108,1%
	Leibung Winkel Z	806,4	860,52	106,7%

*: der maximal aufnehmbaren Kraft nach Eurocode, wenn die DIN mit 100% angenommen wird

5.2 Doppelwinkelvariante 2

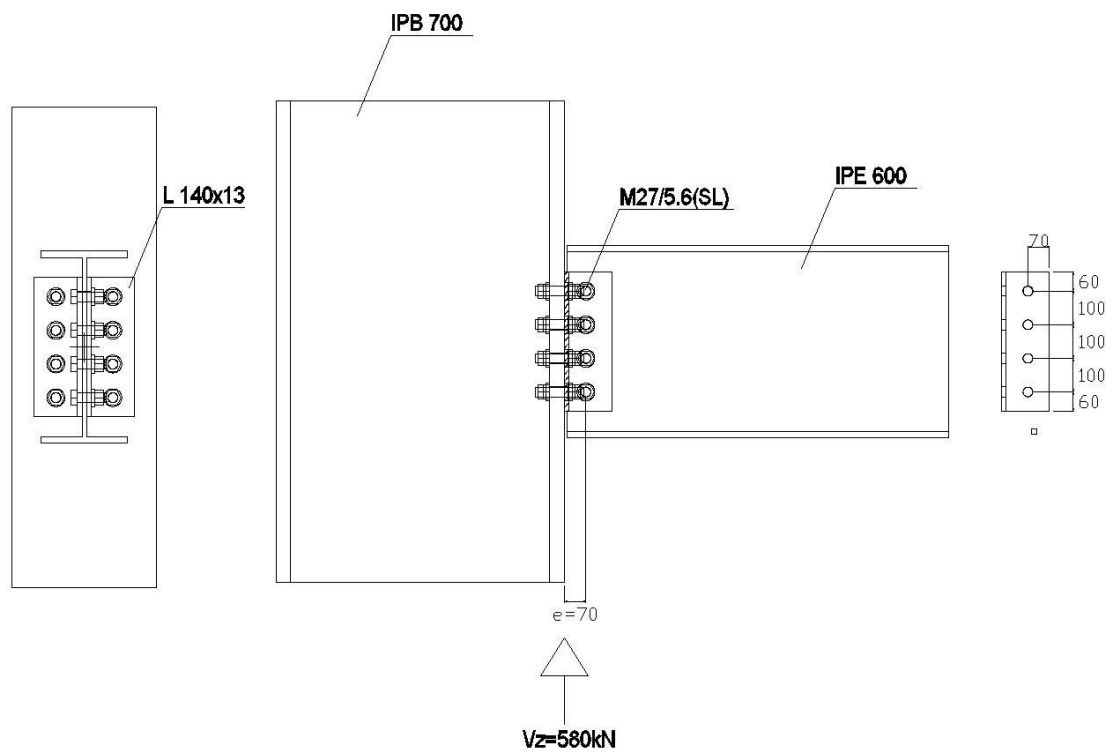


Abbildung 22 Doppelwinkelvariante 2

5.2.1 Doppelwinkel 2 nach DIN

5.2.1.1 Untersuchung des Trägersteges

IPE 600 DIN 1025 T5 S235

gegeben:

$$V_z = 580 \text{ kN}$$

$$f_{y,k} = 240 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$A_{\text{Gurt}} = b * t = 220 \text{ mm} * 19 \text{ mm} = 4180 \text{ mm}^2$$

$$A_{\text{Steg}} = h_1 * s = 514 \text{ mm} * 12 \text{ mm} = 6168 \text{ mm}^2$$

Nachweisführung:

$$\text{wenn } \frac{A_{\text{Gurt}}}{A_{\text{Steg}}} > 0,6 \text{ dann gilt, } \tau = \frac{V_z}{A_{\text{Steg}}}$$

$$\frac{A_{\text{Gurt}}}{A_{\text{Steg}}} = \frac{4180 \text{ mm}^2}{6168 \text{ mm}^2} = 0,67 > 0,6$$

$$\tau = \frac{V_z}{A_{\text{Steg}}} = \frac{580 * 10^3 \text{ N}}{6168 \text{ mm}^2} = 94,03 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$\tau_{R,d} = \frac{f_{y,k}}{\sqrt{3} * \gamma_M} = \frac{240 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}}{\sqrt{3} * 1,1} = 126 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$\frac{\tau}{\tau_{R,d}} = \frac{94,03 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}}{126 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}} = 0,75 < 1,0 \quad \text{Nachweis erfüllt}$$

maximal aufnehmbare Kraft des Trägersteges

$$V_{z,\text{max}} = \tau_{R,d} * A_{\text{Steg}} = 126 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} * 6168 \text{ mm}^2 = 777,17 \text{ kN}$$

5.2.1.2 Ermittlung der resultierenden Schraubenkraft

Vorhanden: 4 Schrauben M27/5.6(SL), Gewinde außerhalb der Scherfuge

Beanspruchung durch V_z und einen Moment durch einen Abstand zum Träger

Resultierende Schraubenkraft

$$N_z = \frac{V_z}{4} = \frac{580\text{kN}}{4} = 145\text{kN}$$

$$N_x = \frac{M}{h} * f$$

$$f = 0,9$$

$$h = 3 * h_{\text{Schraubenbild}} = 3 * 100\text{mm} = 300\text{mm}$$

$$M = V_z * e = 580\text{kN} * 0,07\text{m} = 40,6\text{kNm}$$

$$N_x = \frac{40,6\text{kNm}}{0,3\text{m}} * 0,90 = 121,8\text{kN}$$

$$N_R = \sqrt{N_x^2 + N_z^2} = \sqrt{121,8^2 + 145^2} = 189,37\text{kN}$$

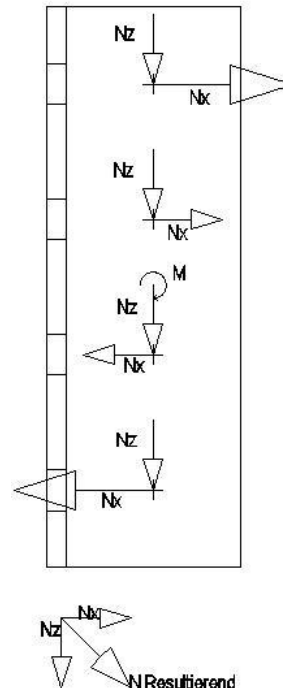


Abbildung 23 Schraubenkraft

5.2.1.3 Nachweis der Schrauben (Verbindung Doppelwinkel IPE 600)

5.2.1.3.1 Ermittlung der Grenzabscherkraft

$$V_{a,R,d} = A * m * \alpha_a * \frac{f_{u,b,k}}{\gamma_M}$$

$$A = 573 \text{ mm}^2 \text{ nach Anlage 2 für M27 (SL) Gewinde außerhalb der Scherfuge}$$

$$m = 2$$

$$\alpha_a = 0,6 \text{ für Schrauben der Festigkeitsklasse 5.6}$$

$$f_{u,b,k} = 500 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \text{ nach Anlage 1}$$

$$\gamma_M = 1,1$$

$$V_{a,R,d} = A * m * \alpha_a * \frac{f_{u,b,k}}{\gamma_M} = 573\text{mm}^2 * 2 * 0,6 * \frac{0,5 \frac{\text{kN}}{\text{mm}^2}}{1,1} = \underline{312,55 \text{ kN}} \text{ /Schraube}$$

$$V_{a,Rd} = n * V_{a,R,d} = 4 * 312,55\text{kN} = \underline{1250,2\text{kN}}$$

Nachweis:

$$\frac{N_R}{V_{a,Rd}} = \frac{189,37\text{kN}}{312,55\text{kN}} = \underline{0,61} < 1,0 \text{ Nachweis erfüllt}$$

5.2.1.3.2 Ermittlung der Grenzlochleibungskraft in Z-Richtung

$$V_{l,R,d} = t * d_{Sch} * \sigma_{l,R,d}$$

$$\sigma_{l,R,d} = \alpha_l * \frac{f_{y,k}}{\gamma_M}$$

$$V_{l,R,d} = t * d_{Sch} * \alpha_l * \frac{f_{y,k}}{\gamma_M}$$

$$f_{y,k} = 240 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$d_{sch} = 27\text{mm}$$

$$\gamma_M = 1,1$$

$$\text{da } e_2 = 70 \text{ mm} \geq 1,5 * d_L = 1,5 * 30 = 45\text{mm}$$

Überprüfung der Schraubenabstände

$$t_{\text{Steg IPE 600}} = 12 \text{ mm}$$

$$t_{\text{Doppelwinkel}} = 2 * 13\text{mm} = 26\text{mm}$$

$$e_1: 1,2 * d_l = 1,2 * 30 = 36\text{mm} \quad < e_1 = 60 \text{ mm} \quad < 3 * d_l = 3 * 30 = 90\text{mm} \\ < 6 * t = 6 * 12 = 72\text{mm}$$

$$e_2: 1,2 * d_l = 1,2 * 30 = 36\text{mm} \quad < e_2 = 70 \text{ mm} \quad < 3 * d_l = 3 * 30 = 90\text{mm} \\ < 6 * t = 6 * 12 = 72\text{mm}$$

$$e \quad 2,2 * d_1 = 2,2 * 30 = 66\text{mm} \quad < e = 100\text{mm} \quad < 6 * d_1 = 6 * 30 = 180\text{mm} \\ < 12 * t = 12 * 12 = 144\text{mm}$$

|| zur Krafrichtung IPE 600

$$\text{Innen: } \alpha_1 = 1,08 * \frac{e}{d_1} - 0,77 = 1,08 * \frac{100}{30} - 0,77 = 2,83$$

$$\text{Rand: } \alpha_1 = 1,1 * \frac{e_{1,\max}}{d_1} - 0,3 = 1,1 * \frac{72}{30} - 0,3 = 2,34$$

|| zur Krafrichtung Doppelwinkel

$$\text{Innen: } \alpha_1 = 1,08 * \frac{e}{d_1} - 0,77 = 1,08 * \frac{100}{30} - 0,77 = 2,83$$

$$\text{Rand: } \alpha_1 = 1,1 * \frac{e_1}{d_1} - 0,3 = 1,1 * \frac{60}{30} - 0,3 = 1,9$$

aufnehmbare Kraft IPE

$$V_{l,Rd} = t * d_{sch} * \alpha_1 * \frac{f_{y,k}}{\gamma_M}$$

$$t = \text{Steg}_{\text{IPE } 600} = 12\text{mm}$$

$$V_{l,Rd,\text{IPE,Rand,Z}} = 12\text{mm} * 27\text{mm} * \frac{0,24 \frac{\text{kN}}{\text{mm}^2}}{1,1} * 2,34 = 165,42\text{kN}$$

$$V_{l,Rd,\text{IPE,Innen,Z}} = 12\text{mm} * 27\text{mm} * \frac{0,24 \frac{\text{kN}}{\text{mm}^2}}{1,1} * 2,83 = 200,06\text{kN}$$

$$V_{l,Rd,\text{IPE,Z}} = 2 * V_{l,Rd,\text{Rand,Z}} + 2 * V_{l,Rd,\text{Innen,Z}}$$

$$V_{l,Rd,\text{IPE,Z}} = 2 * 165,42\text{kN} + 2 * 200,06\text{kN} = \underline{\underline{730,96\text{kN}}}$$

aufnehmbare Kraft Doppelwinkel

$$V_{l,Rd} = t * d_{sch} * \alpha_l * \frac{f_{y,k}}{\gamma_M}$$

$$t = t_{\text{Doppelwinkel}} = 26\text{mm}$$

$$V_{l,Rd,Winkel,Rand,Z} = 26\text{mm} * 27\text{mm} * \frac{0,24 \frac{\text{kN}}{\text{mm}^2}}{1,1} * 1,9 = 291,01\text{kN}$$

$$V_{l,Rd,Winkel,Innen,Z} = 26\text{mm} * 27\text{mm} * \frac{0,24 \frac{\text{kN}}{\text{mm}^2}}{1,1} * 2,83 = 433,45\text{kN}$$

$$V_{l,Rd,Winkel,Z} = 2 * V_{l,Rd,Rand,Z} + 2 * V_{l,Rd,Innen,Z}$$

$$V_{l,Rd,Winkel,Z} = 2 * 291,01\text{kN} + 2 * 433,45\text{kN} = \underline{\underline{1448,92\text{kN}}}$$

maximal aufnehmbare Kraft der Schraubverbindung in Z-Richtung

$$V_{l,Rd} = \min \left\{ \begin{array}{l} V_{l,Rd,IPE,Z} \\ V_{l,Rd,Winkel,Z} \end{array} \right.$$

$$V_{l,Rd} = 730,96\text{kN} = \min \left\{ \begin{array}{l} 730,96\text{kN} \\ 1448,92\text{kN} \end{array} \right.$$

Nachweis

$$\frac{V_z}{V_{l,Rd}} = \frac{580\text{kN}}{730,96\text{kN}} = \underline{\underline{0,79 < 1}} \text{ Nachweis erfüllt!}$$

5.2.1.3.3 Ermittlung der Grenzlochleibungskraft in X-Richtung

$$V_{l,R,d} = t * d_{Sch} * \sigma_{l,R,d}$$

$$\sigma_{l,R,d} = \alpha_l * \frac{f_{y,k}}{\gamma_M}$$

$$V_{l,R,d} = t * d_{Sch} * \alpha_l * \frac{f_{y,k}}{\gamma_M}$$

$$f_{y,k} = 240 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$d_{\text{sch}} = 27\text{mm}$$

$$\gamma_M = 1,1$$

$$\text{da } e_2 = 60 \text{ mm} \geq 1,5 * d_L = 1,5 * 30 = 45\text{mm}$$

Überprüfung der Schraubenabstände

$$t_{\text{Steg IPE 600}} = 12 \text{ mm}$$

$$t_{\text{Doppelwinkel}} = 2 * 13\text{mm} = 26\text{mm}$$

$$e_1: \quad 1,2 * d_1 = 1,2 * 30 = 36\text{mm} \quad < e_1 = 70 \text{ mm} \quad < 3 * d_1 = 3 * 30 = 90\text{mm} \\ & & & < 6 * t = 6 * 12 = 72\text{mm}$$

$$e_2: \quad 1,2 * d_1 = 1,2 * 30 = 36\text{mm} \quad < e_2 = 60\text{mm} \quad < 3 * d_1 = 3 * 30 = 90\text{mm} \\ & & & < 6 * t = 6 * 12 = 72\text{mm}$$

$$e_3: \quad 2,4 * d_1 = 2,4 * 30 = 72\text{mm} \quad < e_3 = 100\text{mm} \quad < 6 * d_1 = 6 * 30 = 180\text{mm} \\ & & & < 12 * t = 12 * 12 = 144\text{mm}$$

|| zur Kraftrichtung IPE 600

es gibt nur Randschrauben

$$\text{Rand: } \alpha_1 = 1,1 * \frac{e_1}{d_1} - 0,3 = 1,1 * \frac{70}{30} - 0,3 = 2,26$$

|| zur Kraftrichtung Doppelwinkel

es gibt nur Randschrauben

$$\text{Rand: } \alpha_1 = 1,1 * \frac{e_1}{d_1} - 0,3 = 1,1 * \frac{70}{30} - 0,3 = 2,26$$

aufnehmbare Kraft IPE

$$V_{l,Rd} = t * d_{sch} * \alpha_1 * \frac{f_{y,k}}{\gamma_M}$$

$$t = t_{IPE\ 600} = 12\text{mm}$$

$$V_{l,Rd,IPE,Rand,X} = 12\text{mm} * 27\text{mm} * \frac{0,24 \frac{\text{kN}}{\text{mm}^2}}{1,1} * 2,26 = 159,76\text{kN}$$

$$V_{l,Rd,IPE,X} = 4 * V_{l,Rd,Rand,X}$$

$$V_{l,Rd,IPE,X} = 4 * 159,76\text{kN} = \underline{639,04\text{kN}}$$

aufnehmbare Kraft Doppelwinkel

$$V_{l,Rd} = t * d_{sch} * \alpha_1 * \frac{f_{y,k}}{\gamma_M}$$

$$t = t_{\text{Doppelwinkel}} = 26\text{mm}$$

$$V_{l,Rd,Winkel,Rand,X} = 26\text{mm} * 27\text{mm} * \frac{0,24 \frac{\text{kN}}{\text{mm}^2}}{1,1} * 2,26 = 346,15\text{kN}$$

$$V_{l,Rd,Winkel,X} = 4 * V_{l,Rd,Rand,X}$$

$$V_{l,Rd,Winkel,X} = 4 * 346,15\text{kN} = \underline{1384,6\text{kN}}$$

maximal aufnehmbare Kraft der Schraubenverbindung in X-Richtung

$$V_{l,Rd} = \min \left\{ \begin{array}{l} V_{l,Rd,IPE,X} \\ V_{l,Rd,Winkel,X} \end{array} \right.$$

$$V_{l,Rd} = 639,04\text{kN} = \min \left\{ \begin{array}{l} 639,04\text{kN} \\ 1384,6\text{kN} \end{array} \right.$$

Nachweis

$$\frac{N_X}{\frac{V_{l,Rd}}{4}} = \frac{121,8\text{kN}}{159,76} = \underline{0,76 < 1,0} \text{ Nachweis erfüllt}$$

5.2.1.4 Nachweis der Schrauben (Verbindung IPB 700 Winkel)

5.2.1.4.1 Ermittlung der Grenzabscherkraft

$$V_{a,R,d} = A * m * \alpha_a * \frac{f_{u,b,k}}{\gamma_M}$$

$A = 573 \text{ mm}^2$ nach Anlage 2 für M27 (SL) Gewinde außerhalb der Scherfuge

$$m = 1$$

$\alpha_a = 0,6$ für Schrauben der Festigkeitsklasse 5.6

$$f_{u,b,k} = 500 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \text{ nach Anlage 1}$$

$$\gamma_M = 1,1$$

$$V_{a,R,d} = A * m * \alpha_a * \frac{f_{u,b,k}}{\gamma_M} = 573\text{mm}^2 * 1 * 0,6 * \frac{0,5 \frac{\text{kN}}{\text{mm}^2}}{1,1} = \underline{156,27 \text{ kN}} / \text{Schraube}$$

$$V_{a,Rd} = n * V_{a,R,d} = 8 * 156,27\text{kN} = \underline{1250,16\text{kN}}$$

Nachweis:

$$\frac{V_z}{V_{a,Rd}} = \frac{580\text{kN}}{1250,16\text{kN}} = \underline{0,46 < 1,0} \text{ Nachweis erfüllt}$$

5.2.1.4.2 Ermittlung der Grenzlochleibungskraft in Z-Richtung

$$V_{l,R,d} = t * d_{\text{Sch}} * \sigma_{l,R,d}$$

$$\sigma_{l,R,d} = \alpha_l * \frac{f_{y,k}}{\gamma_M}$$

$$V_{l,R,d} = t * d_{\text{Sch}} * \alpha_l * \frac{f_{y,k}}{\gamma_M}$$

$$f_{y,k} = 240 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$d_{\text{sch}} = 27\text{mm}$$

$$\gamma_M = 1,1$$

$$\text{da, } e_2 = 70 \text{ mm} \geq 1,5 * d_L = 1,5 * 30 = 45\text{mm}$$

Überprüfung der Schraubenabstände

$$t_{\text{Gurt IPB 700}} = 32 \text{ mm}$$

$$t_{\text{Winkel}} = 13\text{mm}$$

$$\begin{aligned} e_1: \quad 1,2 * d_l = 1,2 * 30 = 36\text{mm} \quad < e_1 = 60 \text{ mm} \quad < 3 * d_l = 3 * 30 = 90\text{mm} \\ < 6 * t = 6 * 13 = 78\text{mm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} e_2: \quad 1,2 * d_l = 1,2 * 30 = 36\text{mm} \quad < e_2 = 70 \text{ mm} \quad < 3 * d_l = 3 * 30 = 90\text{mm} \\ < 6 * t = 6 * 13 = 78\text{mm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} e \quad 2,2 * d_l = 2,2 * 30 = 66\text{mm} \quad < e = 100\text{mm} \quad < 6 * d_l = 6 * 30 = 180\text{mm} \\ < 12 * t = 12 * 13 = 156\text{mm} \end{aligned}$$

|| zur Kraftrichtung IPB 700

$$\text{Innen: } \alpha_l = 1,08 * \frac{e}{d_l} - 0,77 = 1,08 * \frac{100}{30} - 0,77 = 2,83$$

$$\text{Rand: } \alpha_l = 1,1 * \frac{e_{1,\text{max}}}{d_l} - 0,3 = 1,1 * \frac{78}{30} - 0,3 = 2,56$$

|| zur Kraftrichtung Winkel

$$\text{Innen: } \alpha_1 = 1,08 * \frac{e}{d_1} - 0,77 = 1,08 * \frac{100}{30} - 0,77 = 2,83$$

$$\text{Rand: } \alpha_1 = 1,1 * \frac{e_1}{d_1} - 0,3 = 1,1 * \frac{60}{30} - 0,3 = 1,9$$

aufnehmbare Kraft IPB

$$V_{l,Rd} = t * d_{sch} * \alpha_1 * \frac{f_{y,k}}{\gamma_M}$$

$$t = \text{Gurt}_{IPB 700} = 32\text{mm}$$

$$V_{l,Rd,IPB,Rand,Z} = 32\text{mm} * 27\text{mm} * \frac{0,24 \frac{\text{kN}}{\text{mm}^2}}{1,1} * 2,83 = 533,48\text{kN}$$

$$V_{l,Rd,IPB,Innen,Z} = 32\text{mm} * 27\text{mm} * \frac{0,24 \frac{\text{kN}}{\text{mm}^2}}{1,1} * 2,56 = 482,58\text{kN}$$

$$V_{l,Rd,IPB,Z} = 4 * V_{l,Rd,Rand,Z} + 4 * V_{l,Rd,Innen,Z}$$

$$V_{l,Rd,IPB,Z} = 4 * 533,48\text{kN} + 4 * 482,58\text{kN} = \underline{4064,24\text{kN}}$$

aufnehmbare Kraft Winkel

$$V_{l,Rd} = t * d_{sch} * \alpha_1 * \frac{f_{y,k}}{\gamma_M}$$

$$t = t_{lwinkel} = 13\text{mm}$$

$$V_{l,Rd,Winkel,Rand,Z} = 13\text{mm} * 27\text{mm} * \frac{0,24 \frac{\text{kN}}{\text{mm}^2}}{1,1} * 1,9 = 145,51\text{kN}$$

$$V_{l,Rd,Winkel,Innen,Z} = 13\text{mm} * 27\text{mm} * \frac{0,24 \frac{\text{kN}}{\text{mm}^2}}{1,1} * 2,83 = 216,73\text{kN}$$

$$V_{l,Rd,Winkel,Z} = 4 * V_{l,Rd,Rand,Z} + 4 * V_{l,Rd,Innen,Z}$$

$$V_{l,Rd,Winkel,Z} = 4 * 145,51\text{kN} + 4 * 216,73\text{kN} = \underline{1448,93\text{kN}}$$

maximal aufnehmbare Kraft der Schraubenverbindung in Z-Richtung

$$V_{l,Rd} = \min \begin{cases} V_{l,Rd,IPB,Z} \\ V_{l,Rd,Winkel,Z} \end{cases}$$

$$V_{l,Rd} = 1448,93\text{kN} = \min \begin{cases} 4064,24\text{kN} \\ 1448,93\text{kN} \end{cases}$$

Nachweis

$$\frac{V_z}{V_{l,Rd}} = \frac{580\text{kN}}{1448,93\text{kN}} = \underline{0,40 < 1} \text{ Nachweis erfüllt!}$$

5.2.2 Doppelwinkel 2 nach Eurocode

5.2.2.1 Untersuchung des Trägersteges

IPE 600 DIN 1025 T5 S235

gegeben:

$$V_z = 580 \text{ kN}$$

$$f_y = 235 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$A_{\text{Steg}} = h_1 * s = 514 \text{ mm} * 12 \text{ mm} = 6168 \text{ mm}^2$$

Nachweisführung:

$$\tau = \frac{V_z}{A_{\text{Steg}}} = \frac{580 * 10^3 \text{ N}}{6168 \text{ mm}^2} = 94,03 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$\frac{\tau}{\frac{f_y}{\sqrt{3} * \gamma_{M,0}}} \leq 1$$

$$\frac{101,9 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}}{\frac{235 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}}{\sqrt{3} * 1,0}} = \frac{94,03 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}}{135,7 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}} = 0,69 < 1 \text{ Nachweis erfüllt}$$

maximal aufnehmbare Kraft des Trägersteges

$$V_{z,\text{max}} = \frac{f_y}{\sqrt{3} * \gamma_{M,0}} * A_{\text{Steg}} = \frac{235 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}}{\sqrt{3} * 1,0} * 6168 \text{ mm}^2 = 837,6 \text{ kN}$$

5.2.2.2 Ermittlung der resultierenden Schraubenkraft

Vorhanden: 4 Schrauben M27/5.6 (Kategorie A), Gewinde außerhalb der Scherfuge

Beanspruchung durch V_z und einen Moment durch einen Abstand zum Träger

Resultierende Schraubenkraft

$$N_z = \frac{V_z}{4} = \frac{580\text{kN}}{4} = 145\text{kN}$$

$$N_x = \frac{M}{h} * f$$

$$f = 0,9$$

$$h = 3 * h_{\text{Schraubenbild}} = 3 * 100\text{mm} = 300\text{mm}$$

$$M = V_z * e = 580\text{kN} * 0,07\text{m} = 40,6\text{kNm}$$

$$N_x = \frac{40,6\text{kNm}}{0,3\text{m}} * 0,90 = 121,8\text{kN}$$

$$N_R = \sqrt{N_x^2 + N_z^2} = \sqrt{121,8^2 + 145^2} = 189,37\text{kN}$$

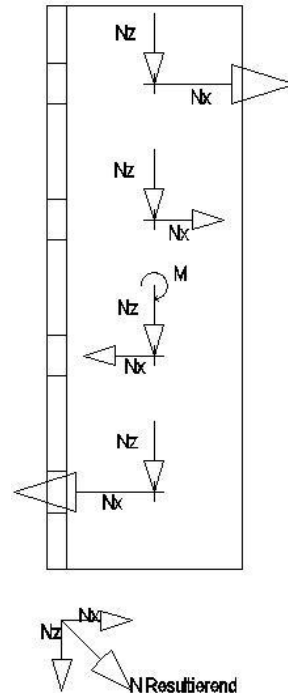


Abbildung 24 Schraubenkraft

5.2.2.3 Nachweis der Schrauben (Verbindung Doppelwinkel IPE 600)

5.2.2.3.1 Ermittlung Grenzabscherkraft

$$F_{v,Rd} = \frac{\alpha_v * f_{ub} * A}{\gamma_{M2}}$$

$A = 573 \text{ mm}^2$ nach Anlage 2 für M27 (Kategorie 1) Gewinde außerhalb der Scherfuge

$\alpha_v = 0,6$ für abgescherten Schaft und allen Festigkeitsklassen

$$m=2$$

$$f_{ub} = 500 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \text{ nach Anlage 1}$$

$$\gamma_{M2} = 1,25$$

$$F_{v,Rd} = \frac{m * \alpha_v * f_{ub} * A}{\gamma_{M2}} = \frac{2 * 0,6 * 0,5 \frac{\text{kN}}{\text{mm}^2} * 573\text{mm}^2}{1,25} = \underline{275,04\text{kN}} / \text{Schraube}$$

$$F_{v,Rd} = n * F_{v,Rd} = 4 * 275,04\text{kN} = 1100,16\text{kN}$$

Nachweis:

$$\frac{N_R}{F_{v,Rd}} = \frac{189,37\text{kN}}{275,04\text{kN}} = \underline{0,69 < 1,0} \text{ Nachweis erfüllt}$$

5.2.2.3.2 Ermittlung der Grenzlochleibungskraft in Z-Richtung

$$F_{b,Rd} = k_1 * \alpha_b * d * t * \frac{f_u}{\gamma_{M2}}$$

$$f_u = 360 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$d = 27\text{mm}$$

$$d_o = 30\text{mm}$$

$$\gamma_{M2} = 1,25$$

$$f_{u,b} = 500 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Überprüfung der Schraubenabstände

$$t_{\text{Steg IPE 600}} = 12\text{mm}$$

$$t_{\text{Doppelwinkel}} = 2 * 13\text{mm} = 26\text{mm}$$

$$e_1: 1,2 * d_o = 1,2 * 30 = 36\text{mm} < e_1 = 60\text{mm} < 4t + 40\text{mm} = 4 * 12 + 40 \\ = 88\text{mm}$$

$$e_2: 1,2 * d_o = 1,2 * 30 = 36\text{mm} < e_2 = 70\text{mm} < 4t + 40\text{mm} = 4 * 12 + 40 \\ = 88\text{mm}$$

$$p_1: 2,2 * d_o = 2,2 * 30 = 66\text{mm} < p_1 = 100\text{mm} < \min \begin{cases} 14 * t = 168\text{mm} \\ 200\text{mm} \end{cases}$$

⊥ zur Kraftrichtung

$$p_{2,\max} = 14 * 12 = 168\text{mm}$$

$$\text{Innen: } k_1 = 2,5 = \min \left\{ \frac{1,4 * \frac{p_2}{d_o} - 1,7}{2,5} = \min \left\{ \frac{1,4 * \frac{168}{30} - 1,7}{2,5} = 6,14 \right. \right.$$

$$\text{Rand: } k_1 = 2,5 = \min \left\{ \begin{array}{l} \frac{2,8 * \frac{e_2}{d_o} - 1,7}{2,5} \\ \frac{1,4 * \frac{p_2}{d_o} - 1,7}{2,5} \end{array} \right. = \min \left\{ \begin{array}{l} \frac{2,8 * \frac{70}{30} - 1,7}{2,5} = 4,83 \\ \frac{1,4 * \frac{168}{30} - 1,7}{2,5} = 6,14 \end{array} \right.$$

∥ zur Kraftrichtung, Randschraube

$$\text{IPE: } \alpha_d = \frac{e_{1,\max}}{3 * d_o} = \frac{88}{3 * 30} = 0,98$$

$$\text{Doppelwinkel: } \alpha_d = \frac{e_1}{3 * d_o} = \frac{60}{3 * 30} = 0,67$$

∥ zur Kraftrichtung, Innenschraube

$$\text{IPE: } \alpha_d = \frac{p_1}{3 * d_o} - 0,25 = \frac{100}{3 * 30} - 0,25 = 0,86$$

$$\text{Doppelwinkel: } \alpha_d = \frac{p_1}{3 * d_o} - 0,25 = \frac{100}{3 * 30} - 0,25 = 0,86$$

Aufnehmbare Kraft IPE

$$t = \text{Steg}_{\text{IPE } 600} = 12\text{mm}$$

Randbereich

$$k_1 = 2,5$$

$$a_b = 0,98 = \min \left\{ \frac{a_d}{f_u} = \min \left\{ \frac{0,98}{360} = 1,38 \right. \right.$$

$$F_{b,Rd} = k_1 * \alpha_b * d * t * \frac{f_u}{\gamma_{M2}}$$

$$F_{b,Rd} = 2,5 * 0,98 * 27\text{mm} * 12\text{mm} * \frac{0,36 \frac{\text{kN}}{\text{mm}^2}}{1,25} = 228,61\text{kN}$$

Innenbereich

$$k_1 = 2,5$$

$$a_b = 0,86 = \min \left\{ \frac{a_d}{f_u} = \min \left\{ \frac{0,86}{500} = 1,38 \right. \right.$$

$$F_{b,Rd} = k_1 * \alpha_b * d * t * \frac{f_u}{\gamma_{M2}}$$

$$F_{b,Rd} = 2,5 * 0,86 * 27\text{mm} * 12\text{mm} * \frac{0,36 \frac{\text{kN}}{\text{mm}^2}}{1,25} = 200,62\text{kN}$$

Kombiniert für IPE

$$F_{b,Rd,IPE,Z} = 2 * (F_{b,Rd,Rand} + F_{b,Rd,Innen}) = 2 * (228,61\text{kN} + 200,62\text{kN})$$

$$= \underline{\underline{858,46\text{kN}}}$$

Aufnehmbare Kraft Doppelwinkel

$$t = t_{\text{Doppelwinkel}} = 2 * 13\text{mm} = 26\text{mm}$$

Randbereich

$$k_1 = 2,5$$

$$a_b = 0,67 = \min \left\{ \frac{a_d}{f_u} = \min \left\{ \frac{0,67}{500} = 1,38 \right. \right.$$

$$F_{b,Rd} = k_1 * \alpha_b * d * t * \frac{f_u}{\gamma_{M2}}$$

$$F_{b,Rd} = 2,5 * 0,67 * 27\text{mm} * 26\text{mm} * \frac{0,36 \frac{\text{kN}}{\text{mm}^2}}{1,25} = 338,64\text{kN}$$

Innenbereich

$$k_1 = 2,5$$

$$a_b = 0,86 = \min \left\{ \frac{a_d}{f_u} = \min \left\{ \frac{0,86}{360} = 1,38 \right. \right.$$

$$F_{b,Rd} = k_1 * \alpha_b * d * t * \frac{f_u}{\gamma_{M2}}$$

$$F_{b,Rd} = 2,5 * 0,86 * 27\text{mm} * 26\text{mm} * \frac{0,36 \frac{\text{kN}}{\text{mm}^2}}{1,25} = 434,68\text{kN}$$

Kombiniert für Doppelwinkel

$$F_{b,Rd,Winkel,Z} = 2 * (F_{b,Rd,Rand} + F_{b,Rd,Innen}) = 2 * (338,64\text{kN} + 434,68\text{kN}) \\ = \underline{1546,64\text{kN}}$$

maximal aufnehmbare Kraft der Schraubenverbindung in Z-Richtung

$$F_{b,Rd} = \min \left\{ F_{b,Rd,IPE,Z} \right.$$

$$F_{b,Rd} = 858,46\text{kN} = \min \left\{ \begin{array}{l} 858,46\text{kN} \\ 1546,64\text{kN} \end{array} \right.$$

Nachweis

$$\frac{V_z}{F_{b,Rd}} = \frac{580\text{kN}}{858,46\text{kN}} = \underline{0,68 < 1,0} \text{ Nachweis erfüllt}$$

5.2.2.3.3 Ermittlung der Grenzlochleibungskraft in X-Richtung

$$F_{b,Rd} = k_1 * \alpha_b * d * t * \frac{f_u}{\gamma_{M2}}$$

$$f_u = 360 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$d = 27\text{mm}$$

$$d_o = 30\text{mm}$$

$$\gamma_{M2} = 1,25$$

$$f_{u,b} = 500 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Überprüfung der Schraubenabstände

$$t_{\text{Steg IPE 600}} = 12\text{mm}$$

$$t_{\text{Doppelwinkel}} = 2 * 13\text{mm} = 26\text{mm}$$

$$e_1: 1,2 * d_o = 1,2 * 30 = 36\text{mm} < e_1 = 70\text{mm} < 4t + 40\text{mm} = 4 * 12 + 40 = 88\text{mm}$$

$$e_2: 1,2 * d_o = 1,2 * 30 = 36\text{mm} < e_2 = 60\text{mm} < 4t + 40\text{mm} = 4 * 12 + 40 = 88\text{mm}$$

$$p_2: 2,4 * d_o = 2,4 * 30 = 72\text{mm} < p_2 = 100\text{mm} < \min \begin{cases} 14 * t = 168\text{mm} \\ 200\text{mm} \end{cases}$$

⊥ zur Kraftrichtung

$$\text{Innen: } k_1 = 2,5 = \min \left\{ \frac{1,4 * \frac{p_2}{d_o} - 1,7}{2,5} = \min \left\{ \frac{1,4 * \frac{100}{30} - 1,7}{2,5} = 2,97 \right. \right.$$

$$\text{Rand: } k_1 = 2,5 = \min \left\{ \frac{2,8 * \frac{e_2}{d_o} - 1,7}{2,5} = \min \left\{ \frac{2,8 * \frac{60}{30} - 1,7}{2,5} = 3,9 \right. \right.$$

|| zur Kraftrichtung, Randschraube

$$\text{IPE: } \alpha_d = \frac{e_1}{3 * d_o} = \frac{70}{3 * 30} = 0,78$$

$$\text{Doppelwinkel: } \alpha_d = \frac{e_1}{3 * d_o} = \frac{70}{3 * 30} = 0,78$$

Aufnehmbare Kraft IPE

$$t = \text{Steg}_{\text{IPE 600}} = 12 \text{ mm}$$

Randbereich

$$k_1 = 2,5$$

$$a_b = 0,78 = \min \left\{ \begin{array}{l} \frac{a_d}{f_{ub}} \\ \frac{f_u}{1,0} \end{array} \right\} = \min \left\{ \begin{array}{l} 0,78 \\ \frac{500}{360} = 1,38 \\ 1,0 \end{array} \right.$$

$$F_{b,Rd} = k_1 * \alpha_b * d * t * \frac{f_u}{\gamma_{M2}}$$

$$F_{b,Rd} = 2,5 * 0,78 * 27\text{mm} * 12\text{mm} * \frac{0,36 \frac{\text{kN}}{\text{mm}^2}}{1,25} = 181,96\text{kN}$$

Kombiniert für IPE

$$F_{b,Rd,IPE,X} = 4 * F_{b,Rd,Rand} = 4 * 181,96\text{kN} = \underline{\underline{727,84\text{kN}}}$$

Aufnehmbare Kraft Doppelwinkel

$$t = t_{\text{Doppelwinkel}} = 2 * 13\text{mm} = 26\text{mm}$$

Randbereich

$$k_1 = 2,5$$

$$a_b = 0,78 = \min \left\{ \begin{array}{l} \frac{a_d}{f_{ub}} \\ \frac{f_u}{1,0} \end{array} \right\} = \min \left\{ \begin{array}{l} 0,78 \\ \frac{500}{360} = 1,38 \\ 1,0 \end{array} \right.$$

$$F_{b,Rd} = k_1 * \alpha_b * d * t * \frac{f_u}{\gamma_{M2}}$$

$$F_{b,Rd} = 2,5 * 0,78 * 27\text{mm} * 26\text{mm} * \frac{0,36 \frac{\text{kN}}{\text{mm}^2}}{1,25} = 394,24\text{kN}$$

Kombiniert für Doppelwinkel

$$F_{b,Rd,Winkel,x} = 4 * F_{b,Rd,Rand} = 4 * 394,24 = \underline{1576,96\text{kN}}$$

maximal aufnehmbare Kraft der Schraubenverbindung in Z-Richtung

$$F_{b,Rd} = \min \left\{ \begin{array}{l} F_{b,Rd,IPE,x} \\ F_{b,Rd,Winkel,x} \end{array} \right.$$

$$F_{b,Rd} = 727,84\text{kN} = \min \left\{ \begin{array}{l} 727,84\text{kN} \\ 1576,96\text{kN} \end{array} \right.$$

Nachweis

$$\frac{N_x}{\frac{F_{b,Rd}}{4}} = \frac{121,8\text{kN}}{181,96\text{kN}} = \underline{0,67 < 1,0} \text{ Nachweis erfüllt}$$

5.2.2.4 Nachweis der Schrauben (Verbindung IPB 700 Winkel)

5.2.2.4.1 Ermittlung der Grenzabscherkraft

$$F_{v,Rd} = \frac{\alpha_v * f_{ub} * A}{\gamma_{M2}}$$

$A = 573 \text{ mm}^2$ nach Anlage 2 für M27 (Kategorie 1) Gewinde außerhalb der Scherfuge

$\alpha_v = 0,6$ für abgescherten Schaft und allen Festigkeitsklassen

$m=1$

$$f_{ub} = 500 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \text{ nach Anlage 1}$$

$$\gamma_{M2} = 1,25$$

$$F_{v,Rd} = \frac{m * \alpha_v * f_{ub} * A}{\gamma_{M2}} = \frac{1 * 0,6 * 0,5 \frac{\text{kN}}{\text{mm}^2} * 573 \text{mm}^2}{1,25} = \underline{137,52 \text{kN}} / \text{Schraube}$$

$$F_{v,Rd} = n * F_{v,Rd} = 8 * 137,52 \text{kN} = 1100,16 \text{kN}$$

Nachweis:

$$\frac{V_z}{F_{v,Rd}} = \frac{580 \text{kN}}{1100,16 \text{kN}} = \underline{0,53} < 1,0 \text{ Nachweis erfüllt}$$

5.2.2.4.2 Ermittlung der Grenzlochleibungskraft in Z-Richtung

$$F_{b,Rd} = k_1 * \alpha_b * d * t * \frac{f_u}{\gamma_{M2}}$$

$$f_u = 360 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$d = 27 \text{mm}$$

$$d_o = 30 \text{mm}$$

$$\gamma_{M2} = 1,25$$

$$f_{u,b} = 500 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Überprüfung der Schraubenabstände

$$t_{\text{Gurt IPB 700}} = 32 \text{mm}$$

$$t_{\text{Winkel}} = 13 \text{mm}$$

$$e_1: 1,2 * d_o = 1,2 * 30 = 36 \text{mm} < e_1 = 60 \text{mm} < 4t + 40 \text{mm} = 4 * 13 + 40 = 92 \text{mm}$$

$$e_2: 1,2 * d_o = 1,2 * 30 = 36 \text{mm} < e_2 = 70 \text{mm} < 4t + 40 \text{mm} = 4 * 13 + 40 = 92 \text{mm}$$

$$p_1: 2,2 * d_o = 2,2 * 30 = 66 \text{mm} < p_1 = 100 \text{mm} < \min \begin{cases} 14 * t = 182 \text{mm} \\ 200 \text{mm} \end{cases}$$

⊥ zur Kraftrichtung

$$p_{2,\max} = 14 * t = 182\text{mm}$$

$$\text{Innen: } k_1 = 2,5 = \min \left\{ \frac{1,4 * \frac{p_{2,\max}}{d_o} - 1,7}{2,5} = \min \left\{ \frac{1,4 * \frac{182}{30} - 1,7}{2,5} = 6,8 \right. \right.$$

$$\text{Rand: } k_1 = 2,5 = \min \left\{ \begin{array}{l} \frac{2,8 * \frac{e_2}{d_o} - 1,7}{1,4 * \frac{p_{2,\max}}{d_o} - 1,7} = \min \left\{ \begin{array}{l} \frac{2,8 * \frac{45}{21} - 1,7}{1,4 * \frac{182}{30} - 1,7} = 4,3 \\ 6,8 \end{array} \right. \end{array} \right.$$

|| zur Kraftrichtung, Randschraube

$$\text{IPB: } \alpha_d = \frac{e_{1,\max}}{3 * d_o} = \frac{92}{3 * 30} = 1,02$$

$$\text{Winkel: } \alpha_d = \frac{e_1}{3 * d_o} = \frac{60}{3 * 30} = 0,67$$

|| zur Kraftrichtung, Innenschraube

$$\text{IPB: } \alpha_d = \frac{p_1}{3 * d_o} - 0,25 = \frac{100}{3 * 30} - 0,25 = 0,86$$

$$\text{Winkel: } \alpha_d = \frac{p_1}{3 * d_o} - 0,25 = \frac{100}{3 * 30} - 0,25 = 0,86$$

Aufnehmbare Kraft IPB

$$t = \text{Gurt}_{\text{IPB } 700} = 32\text{mm}$$

Randbereich

$$k_1 = 2,5$$

$$a_b = 1,0 = \min \left\{ \begin{array}{l} \frac{a_d}{f_{ub}} = \min \left\{ \begin{array}{l} \frac{1,02}{500} = 1,38 \\ 1,0 \end{array} \right. \end{array} \right.$$

$$F_{b,Rd} = k_1 * \alpha_b * d * t * \frac{f_u}{\gamma_{M2}}$$

$$F_{b,Rd} = 2,5 * 1,0 * 27\text{mm} * 32\text{mm} * \frac{0,36 \frac{\text{kN}}{\text{mm}^2}}{1,25} = 622,08\text{kN}$$

Innenbereich

$$k_1 = 2,5$$

$$a_b = 1,0 = \min \left\{ \frac{a_d}{f_{ub}} = \min \left\{ \frac{0,86}{500} = 1,38 \right. \right.$$

$$F_{b,Rd} = k_1 * \alpha_b * d * t * \frac{f_u}{\gamma_{M2}}$$

$$F_{b,Rd} = 2,5 * 0,86 * 27\text{mm} * 32\text{mm} * \frac{0,36 \frac{\text{kN}}{\text{mm}^2}}{1,25} = 534,99\text{kN}$$

Kombiniert für IPE

$$F_{b,Rd,IPB,Z} = 4 * (F_{b,Rd,Rand} + F_{b,Rd,Innen}) = 4 * (622,08\text{kN} + 534,99\text{kN})$$

$$= \underline{\underline{4628,28\text{kN}}}$$

Aufnehmbare Kraft Winkel

$$t = t_{\text{Winkel}} = 13\text{mm}$$

Randbereich

$$k_1 = 2,5$$

$$a_b = 0,67 = \min \left\{ \frac{a_d}{f_{ub}} = \min \left\{ \frac{0,67}{500} = 1,38 \right. \right.$$

$$F_{b,Rd} = k_1 * \alpha_b * d * t * \frac{f_u}{\gamma_{M2}}$$

$$F_{b,Rd} = 2,5 * 0,67 * 27\text{mm} * 13\text{mm} * \frac{0,36 \frac{\text{kN}}{\text{mm}^2}}{1,25} = 169,32\text{kN}$$

Innenbereich

$$k_1 = 2,5$$

$$a_b = 0,86 = \min \left\{ \frac{a_d}{f_u} = \min \left\{ \frac{0,86}{360} = 1,38 \right. \right.$$

$$F_{b,Rd} = k_1 * \alpha_b * d * t * \frac{f_u}{\gamma_{M2}}$$

$$F_{b,Rd} = 2,5 * 0,86 * 27\text{mm} * 13\text{mm} * \frac{0,36 \frac{\text{kN}}{\text{mm}^2}}{1,25} = 217,34\text{kN}$$

Kombiniert für Doppelwinkel

$$F_{b,Rd,Winkel,Z} = 4 * (F_{b,Rd,Rand} + F_{b,Rd,Innen}) = 4 * (169,32\text{kN} + 217,34\text{kN}) \\ = \underline{1546,64\text{kN}}$$

maximal aufnehmbare Kraft der Schraubenverbindung in Z-Richtung

$$F_{b,Rd} = \min \left\{ F_{b,Rd,IPB,X} \right.$$

$$F_{b,Rd} = 1546,64\text{kN} = \min \left\{ \begin{matrix} 4628,28\text{kN} \\ 1546,64\text{kN} \end{matrix} \right.$$

Nachweis

$$\frac{V_Z}{F_{b,Rd}} = \frac{580\text{kN}}{1546,64\text{kN}} = \underline{0,38 < 1,0} \text{ Nachweis erfüllt}$$

5.2.3 Ergebnisvergleich

Tabelle 42 Ergebnisvergleich Doppelwinkel 2

	Vergleich	Aufnehmbare Kraft im kN nach DIN 18800	Aufnehmbare Kraft im kN nach Eurocode	Prozentuale Auswertung*
Allgemein	Trägersteg	777,17	837,6	107,7%
Doppelwinkel/ IPE 400	Abscheren	1250,16	1100,16	88,0%
	Leibung IPE in Z	730,96	858,46	117,5%
	Leibung Winkel in Z	1448,92	1546,64	106,7
	Leibung IPE in X	639,04	727,84	113,9%
	Leibung Winkel in X	1384,6	1576,96	113,9%
Doppelwinkel/ IPB	Abscheren	1250,16	1100,16	88,0%
	Leibung IPB Z	4064,24	4628,28	113,9%
	Leibung Winkel Z	1448,93	1546,64	106,7%

*: der maximal aufnehmbaren Kraft nach Eurocode, wenn die DIN mit 100% angenommen wird

5.3 Prozentuale Auswertung Doppelwinkel

Tabelle 43 Prozentuale Auswertung Doppelwinkel

	Vergleich	Doppelwinkel 1 Prozentuale Auswertung*	Doppelwinkel 2 Prozentuale Auswertung*
Allgemein	Trägersteg	107,7%	107,7%
Doppelwinkel/ IPE 400	Abscheren	88,0%	88,0%
	Leibung IPE in Z	120,1%	117,5%
	Leibung Winkel in Z	106,7%	106,7%
	Leibung IPE in X	113,7%	113,9%
	Leibung Winkel in X	113,7%	113,9%
Doppelwinkel/ IPB	Abscheren	88,0%	88,0%
	Leibung IPB Z	108,1%	113,9%
	Leibung Winkel Z	106,7%	106,7%

*: der maximal aufnehmbaren Kraft nach Eurocode, wenn die DIN mit 100% angenommen wird

6 Diskussion

Im 6. Kapitel der Bachelorarbeit sollen die im Kapitel 4 und 5 ermittelten Rechenergebnisse analysiert und diskutiert werden. Hierbei wird besonders intensiv auf die Unterschiede der maximal aufnehmbaren Kraft zwischen DIN 18800 und Eurocode 3 eingegangen. Es sollen die Ursachen der Abweichungen gefunden und aufgezeigt werden. Auch konstruktive Vorgaben der beiden Regelwerke werden zum Vergleich mit herangezogen. Abschließend wird der zu betreibende Rechenaufwand gegenübergestellt.

6.1 Grundwerkstoff

Der Nachweis des Grundwerkstoffes wurde im Kapitel 4 und 5 jeweils in Form des Trägersteges durchgeführt. Hierbei hat sich herausgestellt, dass nach Eurocode 3 das Grundmaterial rund 8% mehr Kraft aufnehmen kann.

Wechselnde Profilgrößen oder Blechdicken hatten auf die Rechnung erwartungsgemäß keinen Einfluss, denn die Berechnungsmethode der vorhandenen τ Spannung ist identisch. Es gibt lediglich eine kleine Veränderung bei der Berechnung von $\tau_{R,d}$. Sie unterscheiden sich im Teilsicherheitsbeiwert und der Streckgrenze.

Dividiert man die so erhaltenen $\tau_{R,d}$ miteinander, erhält man genau diese Abweichung von 7,7%.

$$\frac{135,7 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}}{125,97 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}} = 1,077$$

Da sich die beiden Berechnungsvarianten nur im Teilsicherheitsbeiwert und der Streckgrenze unterscheiden, ist der Rechenaufwand identisch.

6.2 Schweißnaht

Die Nachweise der Schweißnaht wurden im Kapitel 4 an einer einachsigen beanspruchten Naht zwischen Trägersteg und Stirnplatte vorgenommen.

Es stellte sich heraus, dass nach Eurocode die Schweißnaht rund 5% weniger Kraft aufnehmen darf. Durch die Änderung der Variablen habe ich außerdem festgestellt, dass die Abweichung unter anderem von der Schweißnahtlänge bestimmt wird.

Diese Abhängigkeit lässt sich damit erklären, dass laut Eurocode die Schweißnahtlänge am Anfang und am Ende der Naht jeweils einmal mit dem Wurzelmaß a abzumindern ist. Das soll verhindern, dass Anfangs- und Endkrater als tragfähig angenommen werden. Bei längeren Nähten ist dieser Effekt jedoch zu vernachlässigen, da das Verhältnis von Schweißnahtlänge zur Abminderungsfläche gegen Null tendiert.

Es gibt jedoch nicht nur Veränderungen bei der Berechnung der Schweißnahtspannung, sondern auch bei der Nachweisführung.

Reicht nach der alten Norm bei einachsiger Beanspruchung ein einfacher Spannungsnachweis, so muss nach Eurocode im richtungsbezogenen Verfahren ein Interaktionsnachweis geführt werden.

Bei der Berechnung des Grenzzustandes wird laut DIN 18800 die Streckgrenze des Grundmaterials herangezogen, wobei dem Eurocode die Zugfestigkeit als Grundlage dient. Das sorgt für eine deutlich höhere Grenzspannung nach Eurocode 3.

Im Gegenzug erhält man jedoch auch eine größere innere Spannung bei der Brechung nach Eurocode.

Der Rechenaufwand ist nach der Rechenmethode des Eurocodes durch den geforderten Interaktionsnachweis auch bei einachsiger Beanspruchung höher.

6.3 Risslinie/ Blockversagen

Gibt es bei der ersten Stirnplattenvariante nur eine minimale Abweichung von 1%, so ergibt die zweite Ausführungsvariant eine 13% höhere aufnehmbare Kraft des Eurocodes.

Das zeigt auf, dass diese Unterschiede der Ergebnisse stark im Zusammenhang mit Bauteilgeometrie und Blechdick stehen.

Vergleicht man die Formeln der Verfahren, so stellt man in der Tat nur wenige Gemeinsamkeiten fest. Allein die Berechnung der Risslänge zeigt große Differenzen auf. Wird laut DIN die Risslinie so gebildet, dass sie durch ein Schraubenpaar führt und dann im 60° Winkel das Blech verlässt, so bildet sich nach Eurocode eine erheblich länger Risslinie, die das komplette Schraubenbild herausreißt.

Durch die differierenden Rissbilder erklären sich auch die Unterschiede der Nachweisführung. So kann nach DIN 18800 die Grenzspannung mit der Zugfestigkeit gebildet werden und es erfolgt ein Spannungsnachweis. Im Eurocode 3 wird keine Grenzspannung, sondern eine Grenzkraft errechnet. Da das Rissbild sowohl parallel als auch senkrecht zur angreifenden Kraft verläuft, wird die Grenzkraft mit Hilfe der Zugfestigkeit und der Streckgrenze ermittelt.

Diese Vielzahl der Ungleichheiten ist Ursache der Ergebnisdifferenzen.

Der Rechenaufwand der DIN 18800 ist hier deutlich geringer.

6.4 Abscheren

Die Berechnungen haben gezeigt, dass das Verhältnis der aufnehmbaren Kraft des Eurocodes nur 88% der aufnehmbaren Kraft nach DIN beträgt. Diese 88% wurden in allen Nachweisen sowohl bei der Stirnplatte, als auch beim Doppelwinkel bestätigt.

Somit kann eine Abhängigkeit von geometrischen Änderungen ausgeschlossen werden.

Ein Blick auf die Nachweisformeln zeigt deutlich, dass es keine Unterschiede gibt. Die Werkstoffwerte der Schrauben sind identisch. Es gibt ebenfalls keine Unterschiede in den Schaft- und Spannungsquerschnittsflächen der Schrauben. Auch der Abminderungsbeiwert für die Festigkeitsklassen ist mit 0,6 konstant.

Somit bleibt nur die Abweichung des Teilsicherheitsbeiwertes, der nach DIN 1,1 und nach Eurocode 1,25 beträgt.

Dividiert man die Teilsicherheitsbeiwerte, so bestätigt sich der Wert von 88% der aufnehmbaren Kraft des Eurocodes.

$$\frac{1,1}{1,25} = 0,88$$

Da sich die beiden Berechnungsvarianten nur im Teilsicherheitsbeiwert unterscheiden, gibt es keine Unterschiede hinsichtlich des Rechenaufwandes.

6.5 Lochleibung

Die größten Unterschiede in den Berechnungen sind bei der Lochleibung aufgetreten. Nach meinen Vergleichsrechnungen habe ich festgestellt, dass der Eurocode mehr Kraft aufnehmen kann als die DIN 18800. Der prozentuale Wert schwankt dabei jedoch stark zwischen 7% und 14% möglicher Mehrbelastung.

Dabei ist festzustellen, dass die Abweichungen bei innenliegenden Schrauben teilweise nur 1%, bei Randschrauben jedoch bis zu 44% betragen kann. Die nachstehende Tabelle zeigt die errechneten Werte der Aufgabe „Doppelwinkel 1“ der maximal aufnehmbaren Kraft des IPE durch Lochleibung in Z Richtung.

Tabelle 44 Vergleich Rand-/ Innenschraube

	DIN 18800	Eurocode 3	Prozentuale Auswertung*
Randschraube	81,58 kN	118,08 kN	144,7%
Innenschraube	101,26kN	101,55kN	100,3%

*: der maximal aufnehmbaren Kraft nach Eurocode, wenn die DIN mit 100% angenommen wird

Die Ursachensuche gestaltet sich hier auch bedeutend komplexer, da sich die Rechnungen in manchen Punkten erheblich voneinander abheben.

Ist bei der DIN auch diesmal wieder die Streckgrenze als Berechnungsgrundlage gesetzt, bezieht sich der Eurocode erneut auf die Zugfestigkeit. Bei den Teilsicherheitsbeiwerten ist für die DIN $\gamma_M=1,1$ und bei dem Eurocode $\gamma_{M2}=1,25$ einzusetzen. Diese Veränderungen allein lassen aber keine Schwankungen der Ergebnisse zu, sondern würden sich konstant auf die Ergebnisse auswirken.

Erheblich mehr Einfluss auf die Ergebnisschwankungen haben die Beiwerte. Gibt es bei der alten Berechnungsmethode nur einen Beiwert, der die Loch- bzw. Randabstände in Krafrichtung berücksichtigt, so hat man im neuen Berechnungskonzept einen weiteren Beiwert α_d einfließen lassen. Dieser neue Beiwert soll im Eurocode auch die Loch- und Randabstände senkrecht zur Krafrichtung berücksichtigen und gegebenenfalls den Wert abmindern.

Die dritte Änderung ist, dass sich konstruktive Loch- und Randabstände erheblich verändert haben. So darf nach Eurocode ein deutlich größerer maximaler Randabstand sowohl parallel, als auch senkrecht zur Krafrichtung angenommen werden, wodurch die Ergebnisse signifikant variieren.

Die Kombination dieser 3 Ursachen lässt solch große Abweichungen zu.

Der Rechenaufwand hat sich durch die Einführung eines weiteren Beiwertes nur geringfügig erhöht.

7 Fazit

Ziel dieser Bachelorarbeit war es einen Vergleich zwischen DIN 18800 und dem Eurocode 3 durchzuführen. Dabei sollten die theoretischen Grundlagen für die Berechnung mittels Vergleich der Rechenmethodik gelegt werden. Vergleichsrechnungen anhand von gelenkigen Stirnplatten- und Doppelwinkelanschlüssen sollten Aufschluss über die aufnehmbaren Kräfte geben, und somit praxisrelevante Ergebnisse liefern.

Ein eindeutiges Urteil über die beiden Normen lässt sich nur schwer bilden.

Zu sehr schwanken Rechenaufwand und aufnehmbare Kraft bei den Einzelnachweisen.

Vergleicht man den Rechenaufwand, so lässt sich sagen, dass der Eurocode 3 etwas zeitaufwendiger und komplexer erscheint, was die Kosten der Konstruktion erhöht.

Die Hauptkosten bei Stahlkonstruktionen liegen aber meist im Material. So lassen sich schnell Kosten einsparen, wenn es möglich ist die Profilgröße zu reduzieren. Vergleicht man die Materialwirtschaft, so lässt sich ebenfalls kein eindeutiges Urteil bilden. Bei den Verbindungsmitteln (Schrauben und Schweißnähte) zeichnet sich ab, dass das alte Regelwerk mehr Kräfte aufnehmen kann. Sind es beim Abscheren der Schrauben noch 12 Prozent, so kann es bei der Schweißnaht vernachlässigbar gering werden. Allgemein ist zu sagen, dass nach Eurocode somit größer Schraubengrößen und Schweißnahtdicken zu wählen sind.

Bei den Nachweisen des Grundmaterials zeigt sich jedoch ein entgegengesetztes Bild. Die Nachweise der Lochleibung, Risslinie und des Trägersteges zeigen konstant eine größere aufnehmbare Kraft des Eurocodes. Somit besteht die Möglichkeit, dass bei der Bemessung von Stahlkonstruktionen nach Eurocode ein etwas kleinerer Profilquerschnitt gewählt werden kann als nach DIN 18800. Hiermit besteht unter dem materialwirtschaftlichen Aspekt eine Kostenreduzierung nach dem neuen Regelwerk.

Die Einführung des Eurocodes ist ein großer Schritt im Bauwesen von Europa. Es wurde ein einheitliches Regelwerk geschaffen, welches als Grundlage der Bemessung von Stahl-, Holz-, Aluminium-, Mauerwerk- und Stahlbetonkonstruktionen dient. Es wurde eine einheitliche Basis für Forschung und Entwicklung geschaffen. Das Ziel europaweit einheitliche Entwurfskriterien einzuführen, ist jedoch nicht auf ganzer Linie gelungen. Die nationalen Anhänge lassen den Effekt der Einheitlichkeit etwas verblassen.

8 Anlagen

8.1 Anlage 1 - Charakteristische Werte für Schraubenwerkstoff

Tabelle 45 Charakteristische Werte für Schraubenwerkstoffe (eigene Darstellung, in Anlehnung an Engelmann, 2012, S. 4.5)

de: Festigkeitsklasse		4.6	-	5.6	-	-	8.8	10.9
eu: Schraubenfestigkeitsklasse		4.6	4.8	5.6	5.8	6.8	8.8	10.9
Streckgrenze: N/mm ²	de: $f_{y,b,k}$	240	-	300	-	-	640	900
	eu: f_{yb}	240	320	300	400	480	640	900
Zugfestigkeit: N/mm ²	de: $f_{u,b,k}$	400	400	500	-	-	800	1000
	eu: f_{ub}	400	400	500	500	600	800	1000

8.2 Anlage 2 – Schaft und Spannungsquerschnitt

Tabelle 46 Schaft- und Spannungsquerschnitt (eigene Darstellung in Anlehnung an Engelmann, 2012, S. 4.6)

Angabe in [mm ²]	Gewinde							
	M12	M16	M20	M22	M24	M27	M30	M36
Schaftquerschnitt	113	201	314	380	452	573	707	1018
SL/GV/HR/HV SLP/GVP/HV(P)	133	227	346	415	491	616	755	1075
Spannungsquerschnitt	84,3	157	245	303	353	459	561	817

8.3 Anlage 3 – Charakteristische Werte für Grundwerkstoff

Tabelle 47 Charakteristische Werte für Grundwerkstoff (eigene Darstellung in Anlehnung an Engelman, 2012, S. 4.6)

Stahlsorte		S 235	S 275	S 355
Streckgrenze: N/mm ²	de: $f_{y,k}$	240	275	360
	eu: f_{yk}	235	275	355
Zugfestigkeit: N/mm ²	de: $f_{u,k}$	360	410	470
	eu: f_{uk}	360	430	490

9 Literaturverzeichnis

Auerswald, Daniel: Vergleich der DIN 18800 und des Eurocode 3 anhand von ausgewählten Beispielen, Hochschule Mittweida, Diplomarbeit, 2009.

Bundesingenieurkammer: Deutsches Ingenieur Blatt Heft Juli-August 2012, Fachverlag Schiele & Söhne GmbH, Berlin, 2012

Deutsches Institut für Normung e.V.: DIN 18800-1, Stahlbauten – Bemessung und Konstruktion, Beuth Verlag GmbH, Berlin, November 2008.

Deutsches Institut für Normung e.V.: DIN EN 1993-1-1, Stahlbauten – Bemessung und Konstruktion, Beuth Verlag GmbH, Berlin, Dezember 2010.

Deutsches Institut für Normung e.V.: DIN EN 1993-1-8, Stahlbauten – Bemessung und Konstruktion, Beuth Verlag GmbH, Berlin, Dezember 2010.

Deutsches Institut für Normung e.V.: DIN EN 1090-2, Ausführung von Stahltragwerken und Aluminiumtragwerken, Beuth Verlag GmbH, Berlin, Dezember 2008.

Engelmann, U.: Stahlbaufibel, Bemessung nach Eurocode 3 und DIN 18800 im Vergleich, Beuth Verlag Berlin, Berlin, Wien, Zürich, 2012.

GSI: Unterlagen für den Schweißfachingenieurlehrgang Hauptgebiet 1, GSI – Gesellschaft für Schweißtechnik International mbH, 2011

Laufs, T., Werner, F., Schneider, I.: Skripten zum Lehrgebiet Grundlagen des Stahlbaus – Teil 1, Roßwein, Hochschule Mittweida, University of Applied Science, Ausgabe 2009.

Petersen, M.: Stahlbau nach DIN EN 1993 :2010, EC 3, Hochschule 21 GmbH , Buxtehude, März 2012

TÜV Süd: Mit der Einführung der Eurocodes wird DIN EN 1090 verbindlich, TÜV Süd, München, 2012

Wagenknecht, G.: Stahlbau Praxis nach Eurocode 3, Band 2 Verbindungen und Konstruktionen, 3. Auflage, Beuth Verlag GmbH, Berlin, Wien, Zürich, 2011.

Wagenknecht, G.: Stahlbau Praxis nach DIN 18800, Band 2 Verbindungen und Konstruktionen, 3. Auflage, Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2009.

Selbstständigkeitserklärung

Ich erkläre, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig und nur unter Verwendung der angegebenen Literatur und Hilfsmittel angefertigt habe.

Bearbeitungsort, Datum

Unterschrift